

AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND-  
UND KIEFERHEILKUNDE

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Roland Frankenberger  
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg  
in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH, Standort  
Marburg, Abteilung für Zahnerhaltungskunde

---

**Einfluss verschiedener Bleaching-Einlagen  
auf den Haftverbund von zwei unterschiedlichen  
Befestigungskompositen  
zum Wurzelkanalidentin**

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Medizin  
der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

**Vu Thien Thi Nguyen**  
aus Frechen

Marburg, 2017

Angenommen vom Fachbereich Medizin der  
Philipps-Universität Marburg am 29.11.2017

Gedruckt mit der Genehmigung des Fachbereiches

**Dekan:** Herr Prof. Dr. H. Schäfer

**Referent:** Herr PD Dr. M. Roggendorf

**1. Korreferent:** Herr Prof. U. Lotzmann

*Der schönen Zeit in Marburg gewidmet.*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund und Ziele der Studie .....	1
1.2	Materialien und Methoden.....	1
1.3	Ergebnisse .....	2
1.4	Schlussfolgerung.....	2
<b>2</b>	<b>Summary</b>	<b>3</b>
2.1	Background and Aims .....	3
2.2	Materials and Methods .....	3
2.3	Results .....	4
2.4	Conclusion .....	4
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>7</b>
4.1	Intrinsische Zahnverfärbung.....	7
4.2	Zusammensetzung und Aufbau des Dentins.....	10
4.3	Grundlagen der Zahnaufhellung.....	11
4.4	Bleichsubstanzen und Wirkungsweise .....	12
4.5	Wechselwirkung von Wasserstoffperoxid auf Dentin .....	14
4.6	Klinische Vorgehensweise des internen Bleachings (ATTIN 2009).....	16
4.6.1	Komplikationen und Nebenwirkung durch die Walking-Bleach- Technik.....	18
4.7	Befestigungskomposit .....	19
4.7.1	<i>Bifix SE</i> .....	20
4.7.2	<i>Rebilda DC/ Futurabond U</i> .....	21
4.8	Konditionierung von Wurzelkanalstiften .....	22
<b>5</b>	<b>Versuchsplanung und Zielsetzung</b>	<b>24</b>
5.1	Hypothesen .....	25
<b>6</b>	<b>Material und Methode</b>	<b>26</b>
6.1	Auswahl und Vorbereitung der Versuchszähne .....	26

6.2	Bleaching-Einlage .....	28
6.3	Spülprotokoll .....	29
6.4	Konditionierung der Spreader .....	30
6.5	Befestigung der Spreader mittels Sealer .....	31
6.6	Messreihe .....	33
6.7	Auswertung der Frakturmodi .....	34
6.8	Statistische Auswertung .....	34
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>35</b>
7.1	Statistische Testverfahren .....	35
7.1.1	Shapiro-Wilk-Test .....	35
7.1.2	Kruskal-Wallis-Test .....	35
7.1.3	Mann-Whitney-Test .....	36
7.2	Darstellung der Ergebnisse .....	36
7.2.1	Shapiro-Wilk-Test .....	37
7.2.2	Kruskal-Wallis-Test .....	37
7.2.3	Mann-Whitney-Test .....	39
7.3	Frakturanalyse .....	42
7.3.1	Adhäsionsbruch .....	42
7.3.2	Kohäsionsbruch .....	42
7.3.3	Mischbruch .....	43
7.3.4	Stiftfraktur .....	42
7.4	Auswertung der Spreader .....	43
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>45</b>
8.1	Diskussion der Methodik .....	45
8.1.1	Auswahl und Vorbereitung der Probenzähne .....	45
8.1.2	Interne Bleicheinlage und Konzentration .....	46
8.1.3	Einsatz von Stahlspreader zur Analyse des Haftverbunds .....	48
8.1.4	Einfluss der Schmierschicht .....	50
8.1.5	Zementierung der Spreader .....	50
8.1.6	Pull-out-Analyse .....	51
8.2	Diskussion der Ergebnisse .....	52
8.2.1	Prüfung der Hypothesen .....	54
8.2.2	Beurteilung der Frakturmodi .....	56
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>58</b>

<b>10 Anhang</b>	<b>68</b>
10.1 Materialliste .....	68
10.2 Abkürzungsverzeichnis .....	70
10.3 Übersicht der Tabellen .....	72
10.4 Übersicht der Abbildungen .....	72
<b>11 Verzeichnis der akademischen Lehrer</b>	<b>73</b>
<b>12 Lebenslauf</b>	<b>74</b>
<b>13 Danksagung</b>	<b>75</b>
<b>14 Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>76</b>

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Hintergrund und Ziele der Studie

Intrinsisch verfärbte Zähne können mithilfe eines intrakanalär eingebrachten Bleichmittels aufgehellt werden. Voraussetzung für eine langzeiterfolgreiche Behandlung ist eine adäquate Wurzelkanalfüllung und anschließender koronaler Verschluss der Eingangskavität mit Komposit. Entscheidend für den Langzeiterfolg ist die Haftung des Befestigungskomposits am Dentin.

In dieser In-vitro-Studie soll geklärt werden, inwiefern der Haftverbund nach Einlage der internen Bleaching-Materialien Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> im Wurzelkanal die Verwendung adhäsiver Befestigungskomposite beeinflusst. Hierzu wurden die Komposite *BiFix SE* und *Rebilda DC* verwendet.

## 1.2 Materialien und Methoden

Grundlage dieser Versuchsreihe waren 70 humane, einkanalige, füllungsfreie Zähne mit geradem Wurzelverlauf und möglichst rundem Wurzelquerschnitt.

Nach erfolgter Dekoronation wurde der Wurzelkanal maschinell aufbereitet. Die Vorbereitung der Versuchszähne war abgeschlossen, sobald eine identische Arbeitslänge von 8 mm vorlag.

Von den 70 Versuchszähnen wurden 48 den beiden zu testenden Bleaching-Materialien zugeordnet, wobei 24 Zähnen mit Natriumperborat und 24 mit *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> (VOCO) präpariert wurden. 22 Zähne ohne Bleicheinlage dienten als Kontrollgruppe.

Nach dem 7-tägigen Bleichvorgang wurden alle Gruppen mit einem identischen Spülprotokoll gereinigt. Jeder Versuchszahn sollte mit einem angepassten und konditionierten Stahlspreader in den Wurzelkanal verklebt werden. Dazu wurden die drei Versuchsgruppen erneut hälftig aufgeteilt. Der einen Hälfte wurde das Befestigungskomposit *BiFix SE* (VOCO), der anderen *Rebilda DC* (VOCO) zugeteilt.

In der Zwick-Universalprüfmaschine wurde nach einer 7-tägigen Aushärtezeit der Zugversuch durchgeführt. Dabei wurde der aufgebrauchte Kraftaufwand, der benötigt wird, um den Spreader aus dem Wurzelkanal zu extrudieren, dokumentiert.

### 1.3 Ergebnisse

Die höchsten Haftwerte erzielten *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> und *Rebilda DC* als Befestigungskomposit (8,17 MPa). Vergleichbar dazu schnitten auch die Gruppen Natriumperborat mit *Rebilda DC* (6,72 MPa) und die Kontrollgruppe mit *BiFix SE* (7,82 MPa), sowie die Kontrollgruppe ohne Bleicheinlage und *Rebilda DC* (7,63 MPa) ab. Lediglich der Einsatz der Bleichmittel Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> in Verbindung mit *BiFix SE* wiesen signifikant geringere Haftwerte im Vergleich zu den anderen Gruppen auf.

### 1.4 Schlussfolgerung

Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie kann davon ausgegangen werden, dass nicht die Wahl des Bleichmaterials (Natriumperborat oder *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup>) über den Verbund zwischen Wurzelkanalentin und Spreader entscheidet, sondern die Kombination mit dem verwendeten Befestigungskomposit.

Die Haftwerte von *Rebilda DC* und *BiFix SE* ohne Verwendung einer Bleicheinlage waren miteinander vergleichbar. Soll jedoch ein interner Bleichvorgang durchgeführt werden, wird die Verwendung von *Rebilda DC* empfohlen, da die Haftwerte durch den Bleichvorgang, sowohl mit Natriumperborat als auch *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup>, kaum verändert wurden.



## 2 Summary

### 2.1 Background and Aims

Intrinsically discolored teeth can be whitened by bleaching agents, which are injected inside the pulp. The requirements for a long-term succeeding therapy are an adequate root canal filling with a subsequent coronal seal of the access cavity with composite. The adhesion of the composite to dentine is very crucial.

This in-vitro study aimed to investigate the effect of internal bleaching with two bleaching materials sodium perborate and *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> in the bond strength of two luting composites, the self-adhesive *BiFix SE* and the multi-step luting composite *Rebilda DC*.

### 2.2 Materials and Methods

This study contained 70 human, straight-rooted teeth with a single root canal and a round cross section. The decoronation of the root canal was followed by the mechanical preparation. As soon as an exact length of 8 mm was achieved for all the teeth, the preparation is completed.

48 of the 70 teeth were assigned to either of the testing bleach materials. Thereof, 24 teeth were prepared with sodium perborate and 24 with *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup>. The control group of 22 teeth was not exposed to any whitening treatment.

After 7 days of bleaching, each tooth was rinsed in an identical manner. The adjusted and conditioned steel spreader was inserted into the root canal of each tooth using both composites. Therefore, the three groups were each divided equally amongst the composite *BiFix SE* and *Rebilda DC*. After 7 days of hardening, the pull-out test was performed in the Zwick universal testing device. The physical effort applied by the machine to extrude the spreader out of the root canal was documented.

## 2.3 Results

The highest bond strength was achieved by *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> with *Rebilda DC* as the composite (8,17 MPa). Similar results were reached by the group with sodium perborate and *Rebilda DC* (6,72 MPa) and the control group with *Rebilda DC* (7,63 MPa), as well as the control group with *BiFix SE* (7,82 MPa). Only sodium perborate and *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> along with *BiFix SE* showed significantly lower adhesion coefficients compared to all the other groups.

## 2.4 Conclusion

The varying adhesion coefficients resulted from different combinations of composites and bleaching agents. The usage of *Rebilda DC* and *BiFix SE* showed similar bonding rates when used without bleaching agents. If an internal bleaching therapy is utilized, the usage of *Rebilda DC* is recommended over *BiFix SE* because the adhesion coefficient was constant independent of the bleaching agents, sodium perborate and *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup>.

### 3 Einleitung

Das Erscheinungsbild eines Menschen entscheidet über seine Wahrnehmung durch die Umwelt, sodass einer Person der Attraktivität entsprechend positive Eigenschaften wie Gesundheit, Leistungsfähigkeit, Erfolg und Kreativität unterbewusst zugeschrieben werden.

Auch in der Zahnmedizin gewinnt heutzutage der ästhetische Aspekt immer mehr an Bedeutung. Zahnmedizin ist nicht mehr rein funktionell, sondern soll auch die Lebensqualität und das Selbstwertgefühl der Patienten verbessern. Obwohl Schönheitsideale subjektiv wahrgenommen werden, bestehen klare Vorstellungen hinsichtlich der dentalen Ästhetik. Hierbei stehen die Form und Stellung der Zähne und insbesondere die Zahnfarbe im Fokus.

Die Ursache für Zahnverfärbungen kann unterschiedlicher Ätiologie sein. Differenziert wird zwischen externer und interner Verfärbung mit prä- oder post-eruptivem Entstehungszeitpunkt. Lagern sich farbgebende Stoffe, sogenannte Chromogene, permanent in der äußeren Zahnoberfläche ein, wird dieses Phänomen als externe Verfärbung bezeichnet. Diese Stoffe stammen von Nahrungsmitteln, vor allem Kaffee, Tee oder Rotwein. Auch Medikamente wie Chlorhexidin oder Tetracycline können zu äußerlichen Verfärbungen der Zähne führen. Externe Verfärbungen können durch eine gute Mundhygiene und professionelle Zahnreinigung vermieden sowie entfernt werden. Dies ist bei intrinsischen Verfärbungen nicht möglich, da sich diese innerhalb der Zahnhartsubstanz einlagern und sowohl Zahnschmelz als auch Dentin betreffen können. Als Ursachen werden genetische Erkrankungen (Amelogenesis imperfecta), dentale Werkstoffe (Amalgam, eugenolhaltige Präparate), aber auch Traumata gesehen.

Diese intrakanalären Verfärbungen können nur durch internes Bleichen aufgehoben werden. Als Voraussetzung für ein erfolgreiches Bleichen bei avitalen sowie vitalen Zähnen gilt eine adäquate Wurzelkanalbehandlung mit einem dichten Verschluss des Wurzelkanals, um das apikale System durch das Bleaching-Material nicht zu irritieren.

Im Verlauf der Wurzelkanalbehandlung wird durch Abtrag der Zahnhartsubstanz die Zahnkrone und Wurzel zentral geschwächt, wodurch ein künstlicher Kern und Verschluss des Zahnes notwendig wird. Wesentliche Aufgabe dieses Verschlusses ist es, Keimfreiheit zu gewährleisten, ein erneutes Einwandern von Chromogenen in den Zahn zu verhindern und die Stabilität des Zahnes zu erhöhen. Dazu ist ein dichter Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Befestigungskomposit elementar.

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss von einzelnen internen Bleichmaterialien auf den Haftverbund zweier unterschiedlicher Befestigungskomposite zum Wurzelkanalentin zu untersuchen. In diesem In-vitro-Versuch wurden die Wechselwirkungen der Bleichmittel Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> mit den Befestigungskompositen *BiFix SE* und *Rebilda DC* untersucht.

## 4 Literaturübersicht

### 4.1 Intrinsische Zahnverfärbung

Die Ätiologie für interne Zahnverfärbung ist vielseitig. Sie können prä- sowie posteruptiven Ursprungs sein. Dabei ist eine Farbveränderung innerhalb der Zahnhartsubstanz von der Pulpahöhle ausgehend gemein.

Findet die Diskoloration vor Zahndurchbruch statt, können Medikamente, Metabolismus, Genetik und Zahntrauma mögliche Ursachen sein. Posteruptive Verfärbungen können hämatogen und durch Pulpanekrosen verursacht werden. Auch Verbraucherscheinungen, die eine Kalzifikation des Zahnes mit sich bringen oder durch zahnärztliche Materialien iatrogen determiniert sind, können mögliche Gründe sein. (PLOTINO et al. 2008)

Präruptiver Ursprung	Posteruptiver Ursprung
<b>Medikamente</b>	<b>Wurzelresorption</b>
▪ Tetrazykline	<b>Interne Resorption</b>
<b>Stoffwechsel</b>	<b>Alterungsprozesse</b>
▪ Fluorose	<b>Pulpanekrose</b>
<b>Genetik</b>	<b>Intrapulpale Einblutung</b>
▪ Hyperbilirubinämie	<b>Pulpareste nach endodontischer Behandlung</b>
▪ Amelogenesis imperfecta	
▪ Dentinogenesis imperfecta	<b>Endodontische Materialien</b>
<b>Zahntrauma</b>	▪ Einlagen
	▪ Wurzelkanalsealer
	▪ Guttapercha
	<b>Füllungsmaterialien</b>
	▪ Silber
	▪ Amalgam

**Tab. 1:** Ätiologie intrinsischer Zahnverfärbung (WATTS et al. 2002)

Erfolgt das Trauma während der Zahnentwicklung, also präeruptiv, kann dies unterschiedliche Auswirkungen auf den bleibenden Zahn haben. Die Ausprägung der Dysplasie steht in Abhängigkeit zu Art und Schweregrad des Traumas, sowie des Entwicklungsstandes des Zahnkeimes. Lokale Traumata reichen von Hypoplasien wie Farbveränderungen im Schmelz (weiß bis gelbbraun), bis hin zu Formdefekten (Schmelzeinkerbung, Dilazeration). Werden Ameloblasten durch die Kraft eines mechanischen Traumas zerstört, kann dies sogar zu einer Stagnation der Entwicklung des betroffenen Zahnes führen (HELLWIG et al. 2009). Kommt es infolge eines Traumas posteruptiv zu einer Zahnverfärbung, ist dies meist hämorrhagischen Ursprungs aufgrund einer Ruptur der intrapulpären Blutgefäße, wobei das austretende Blut in die Dentinkanälchen gelangt, wo seine Zersetzung stattfindet (LANGSDORFF 1874; PLOTINO et al. 2008). Die Verfärbung des Zahnes resultiert aus den Abbauprodukten der Erythrozyten. Durch die Degradation der im Blut enthaltenen Erythrozyten wird Hämoglobin freigesetzt, das in seine Bestandteile Hämosiderin, Hämin, Hämatin, Hämatoidin und Hämatoporphyrin zersetzt wird (ARENS 1989; ATTIN 2009).

Von den Abbauprodukten des Hämoglobins werden die freien Eisen-II-Ionen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) abgespalten. Durch die Reaktion (**R1.**) der freien Eisen-II-Ionen aus der Hämolyse mit dem Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) aus dem Bakterienstoffwechsel entsteht das schwarze, unlösliche Eisen-II-Sulfid ( $\text{FeS}$ ). Dieses ausfallende Eisen-II-Sulfid ist für die Grau-Verfärbung des Zahnes bei Bakterienpräsenz verantwortlich, z.B. bei einer Entzündung oder Kariesbefall der Pulpa (GLOCKNER et al. 1997; GULDENER et al. 1987).



Wie verhält es sich aber bei nicht infizierten Zähnen? Dieser Fragestellung widmete sich auch MARIN in einem In-vitro-Test und konnte die Ursache für die hämorrhagische Verfärbung marktoter Prämolaren bei Bakterienfreiheit feststellen. Nicht die freien Eisen-II-Ionen und Hämosiderin sind für die permanente

Diskoloration verantwortlich, sondern die Blutpigmente Hämoglobin und Hämatin (MARIN et al.1997).

Auch das zunehmende Alter und der Abnutzungsgrad der Zähne spielen eine Rolle bei der Beeinflussung der Zahnfarbe. Prozesse wie Abrasion, Attrition und Erosion verringern die Dicke der transluzenten Schmelzschicht, wodurch das natürlich gelbe Dentin stärker in Erscheinung tritt (TAATZ 1976). Im Laufe des Lebens wird Dentin fortwährend nachgebildet, wodurch das Sekundärdentin entsteht (HELLWIG et al. 2009). Dieser physiologische Vorgang verleiht dem Zahn eine gelblich-bräunliche bis hin zu gräulicher Erscheinung (ATTIN 1998).

Farbveränderungen der Zähne treten nicht nur altersbedingt auf, sondern können auch durch thermische, physikalische und chemische Reize auf die Pulpa entstehen. Die vitale Pulpa respondiert als Schutzreaktion mit einer internen Sklerosierung. Es folgt die Obliteration der pulpanahen Dentinkanälchen und die Bildung von Tertiärdentin (THORSDARSON et al. 1991; WEST 1997). Bei dieser Art der Zahnverfärbung können sowohl Schmelz als auch Dentin betroffen sein, sodass eine mechanische Reinigung keine Verbesserung bewirkt.

Ebenso können eine Reihe dentaler Werkstoffe wie Spüllösungen, medikamentöse Einlagen, Wurzelkanalfüllmaterialien, aber auch Füllungsmaterialien zu einer ästhetischen Beeinträchtigung der Zahnfarbe führen. Die beiden Spüllösungen Natriumhypochlorit und Chlorhexidindiglukonat werden aufgrund ihrer effektiven bakteriziden Wirkung und ihrer guten Verträglichkeit (ANDERSEN et al. 1992, WENNBERG 1980) gerne in einem Spülprotokoll verwendet. Dennoch induziert ein unmittelbar aufeinanderfolgender Gebrauch unerwünschte Nebenwirkungen. Laut der Stellungnahme der DGZMK von 2006 kommt es zu einer Ablagerung von Chlorhexidin-Kristallen sobald Natriumhypochlorit und Chlorhexidindiglukonat miteinander in Berührung kommen. Durch dieses braun-rot gefärbte Präzipitat im Wurzelkanal kann es zu einer Diskoloration des gesamten Zahnes kommen (BASRANI et al. 2007; ROSSI-FEDELE et al. 2012). Dieses Phänomen kann durch eine Zwischenspülung mit reinem Alkohol oder Kochsalzlösung umgangen werden (RÖDIG 2010).

Auch medikamentöse Einlagen können der Ursprung für intrinsische Verfärbungen sein. So kann *Ledermix* bei kanalärer und pulpärer Applikation eine graubraune Verfärbung des gesamten Zahnes verursachen. Jedoch kann der Behandler dem Grad der Farbveränderung vorbeugen, indem *Ledermix* streng unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze eingebracht oder eine intradentale Dunkellagerung vorgenommen wird (KIM et al. 2000).

Eine Zahnverfärbung ist ebenfalls durch eine Vielzahl von Wurzelfüllungs-materialien und Zementen möglich. *Endofill*, Zinkoxideugenol, *Tubli-Seal*, *AH 26*, Guttapercha, *Apatit root sealer* und *Cavizol* verursachen in absteigender Reihenfolge unterschiedlich starke Diskolorationen (PARTOVI et al. 2006). So induziert *Diaket* eine Rosafärbung, wobei Eugenol-Zement und *Endomethasone* jeweils orangerot und *AH26* grau färben (DAYAN et al. 1983; PLASSCHAERT et al. 1988).

Darüber hinaus verursachen Metalle wie Amalgam und Silber, z.B. in Form von Silberstiften, durch Metallionendiffusion in die umliegenden Bereiche der Zahnhartsubstanz eine kaum bleichfähige Graufärbung (FEINMAN et al. 1987; FITCH 1861; GLOCKNER et al. 1993).

## **4.2 Zusammensetzung und Aufbau des Dentins**

Dentin bildet den Hauptbestandteil eines Zahnes. Er wird im koronalen Anteil von Schmelz und im radikalen Bereich von Wurzelzement umhüllt. Seine Zusammensetzung wird aus 70 Gewichtsprozent anorganischer und 20 Gewichtsprozent organischer Substanz gebildet. Die restlichen 10 Gewichtsprozent bestehen aus Wasser (SCHROEDER 2000). Im Wesentlichen beinhalten die anorganischen Anteile Hydroxylapatit bzw. Kalziumphosphat in kristalliner Form, Magnesium und Spurenelementen. Die organische Komponente setzt sich aus 90% Typ-I-Kollagenfasern zusammen (BALE et al. 1936; HELLWIG et al. 2009).

Das Dentin umschließt die Pulpa vollständig. An der Pulpa-Dentin-Grenze sind die Zellkörper der Odontoblasten lokalisiert. Deren Fortsätze strahlen innerhalb kleiner Röhrchen, den Dentinkanälchen, durch das gesamte Dentin (SCHROEDER 2000).



Dentin liegt nicht als homogenes Gewebe, sondern in verschiedenen Schichten mit unterschiedlichen Mineralisierungsgraden vor. Zur Pulpa-Dentin-Grenze hin befindet sich die organische Vorstufe des Dentins, das hypomineralisierte Prädentin. Nach peripher hin folgt eine Zone der Mineralisation, das Zwischen- und zirkumpulpäre Dentin. Anschließend ist an der Schmelz-Dentin-Grenze das wenig stark mineralisierte Manteldentin zu finden. Umgeben werden die Odontoblastenfortsätze von peritubulärem Dentin, das die stärkste Mineralisation aufzeigt.

Die Odontoblasten reagieren mithilfe ihrer Fortsätze auf äußere, lokale Reize und können lebenslänglich Dentin nachsezernieren. Bis zum Abschluss des Wurzelwachstums wird das gebildete Dentin als Primärdentin bezeichnet. Das nachfolgend regulär angebaute Sekundärdentin ist ein lebenslang andauernder Prozess. Reagieren die Odontoblasten auf Reize wie Karies, kommt es zu einer Tertiärdentinproduktion als autonome Schutzreaktion der Pulpa. Dieses Tertiärdentin hat eine dunklere Färbung (HELLWIG et al. 2009). Aufgrund dieses engen Zusammenspiels zwischen Pulpa und Dentin werden sie als eine Gesamtheit angesehen (SCHROEDER 2000; HÜLSMANN 2008).

#### **4.3 Grundlagen der Zahnaufhellung**

Um einen zahnaufhellenden Effekt zu erhalten, können sowohl mechanische als auch chemische Verfahren angewendet werden. Als mechanisch wird die Entfernung von Ablagerungen und Verfärbungen rein durch Substanzabtrag von der Zahnoberfläche angesehen. Die chemischen Methoden beruhen auf den Wirkstoffreaktionen des instabilen Wasserstoffperoxids ( $H_2O_2$ ) um die anorganischen bzw. organischen Farbpigmente durch Redoxreaktionen aus der Zahnhartsubstanz zu lösen (WEIGERT 1978).

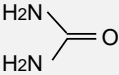
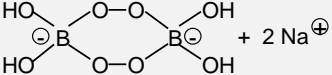
Die für eine Zahnverfärbung verantwortlichen organischen Farbstoffe bestehen aus langen Ketten konjugierter Kohlenstoff-Moleküle, die in Einfach- und Doppelbindungen zueinander stehen. Durch Spaltung dieser Kohlenstoff-Doppelbindungen kommt es zu einer Veränderung ihrer Eigenschaften und Farbe (ZIMMERLI et al. 2010). Diese Technik zur Farbkorrektur wurde bereits 1884 von HARLAN entdeckt

(PEARSON 1951) und im Laufe der Zeit in Bezug auf Wirksamkeit, Methodik und Sicherheit optimiert. Das Maß der zahnaufhellenden Wirkung ist variabel und wird durch folgende Faktoren beeinflusst: Bleichmittelkonzentration, Dauer sowie Häufigkeit der Anwendung. Auch Art und Ursprung der Verfärbung definieren die Wahl und den Erfolg der Bleichtherapie (JOINER 2006).

Die Art der Zahnverfärbung stellt die Indikation für eine externe oder interne Bleichtherapie. Für externe Farbkorrekturen stehen diverse Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung. Sogenannte In-Office-Bleaching und Chairside-Bleaching sind Methoden, die ausschließlich in der Zahnarztpraxis unter Aufsicht zur Anwendung kommen, da sie eine besonders hohe Bleichmittelkonzentration haben. Zur Heimanwendung werden weniger stark konzentrierte Aufhellungsprodukte unter zahnärztlicher Kontrolle (Nightguard-Bleaching) oder frei verkäuflich (Home-Bleaching) angeboten (ATTIN 2009; Schmidt et al. 2014). Für interne Verfärbungen wird die Walking-Bleach-Technik bevorzugt.

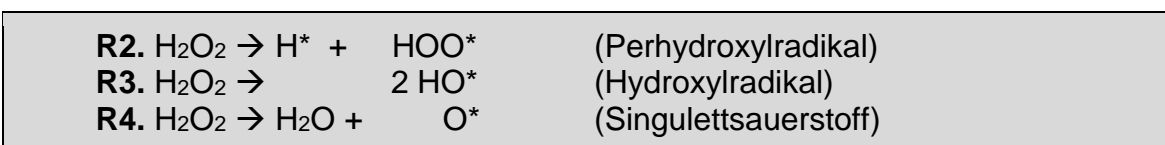
#### **4.4 Bleichsubstanzen und Wirkungsweisen**

Der zahnaufhellende Effekt des Natriumperborats wurde bereits früh erkannt, während Carbamidperoxid hingegen erst später als Bleichmittel entdeckt wurde. Seither sind beide Stoffe im Bereich der dentalen Farbkorrektur etabliert. Der Wirksamkeit beider Stoffe liegt Wasserstoffperoxid zugrunde. Peroxide haben durch ihr geringes Molekulargewicht die Fähigkeit, in die Zahnhartsubstanz entlang des Konzentrationsgradienten zu diffundieren, um dort wirksam zu werden (ARWILL et al. 1969).

Wasserstoffperoxid	Carbamidperoxid	Natriumperborat
$\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	$\text{Na}_2(\text{B}_2(\text{O}_2)_2(\text{OH})_4)$
$\text{HO}-\text{OH}$		

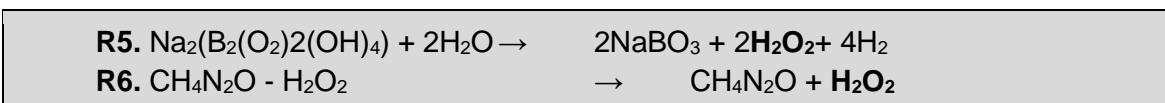
**Abb. 1:** Peroxide (nach MORTIMER et al. 2010)

Wasserstoffperoxid selbst ist instabil und zerfällt umgehend bei Kontakt mit Licht, Luft oder Wasser unter Ausbildung der freien Radikale Perhydroxylradikal, Hydroxylradikal oder Singulett-Sauerstoff (**R2.-4.**) (WEIGERT 1978; DAHL et al. 2003).



Die ausgeprägte Reaktivität der Radikale wird durch ungepaarte Valenzelektronen auf der äußeren Elektronenschale determiniert (BECKEY 1958). Der Mechanismus der Zahnaufhellung beruht auf dieser Reaktionsfreudigkeit mit den Farbpigmenten. Unter Aufspaltung der Doppelbindungen durch Oxidation innerhalb der konjugierten Ketten kommt es zur Degradation der Chromogene. Durch diesen Prozess entstehen farbschwächere bis farblose Produkte (JOINER 2006).

Natriumperborat und Carbamidperoxid dienen als stabilere Depotmittel zur Verzögerung der schnellen Induktion des Wasserstoffperoxidzerfalles. Erst nach Spaltung des Natriumperborates (**R5.**) bzw. Carbamidperoxids (**R6.**) wird Wasserstoffperoxid sukzessiv für weitere Reaktionen freigegeben (**R2.-4.**) (DAHL et al. 2003).



Des Weiteren unterstützt Carbamidperoxid mithilfe seines zusätzlichen Reaktionsproduktes Harnstoff ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) die bleichende Wirkung des Wasserstoffperoxids. Durch die Abspaltung des Harnstoffes entsteht neben Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) auch Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) (R7.).



Der pH-Wert wird durch die Präsenz von Ammoniak auf ein alkalisches Level erhöht und senkt somit das Niveau der benötigten Aktivierungsenergie zur Bildung von freien Radikalen aus Wasserstoffperoxid (MACHU 1951).

#### 4.5 Wechselwirkung von Wasserstoffperoxid auf Dentin

Bei der intrakanalären Bleichtherapie ist es unumgänglich, das Dentin in direkten Kontakt mit Wasserstoffperoxid zu bringen. Von klinischer Relevanz sind die Wechselwirkungen der Bleichsubstanzen in Bezug auf die Integrität der Zahnhartsubstanz. Untersucht wurden das Erosions- und Abrasionsverhalten von Dentin, die Härte und die Oberflächenmikrostruktur vor und nach der Bleichbehandlung. Trotz zahlreicher Untersuchungen liegen in der relevanten Literatur noch keine einheitlichen Ergebnisse vor.

SULIEMANN stellte in einer In-vitro-Studie keine signifikanten Unterschiede im Abrasionsverhalten von Dentin nach einer Behandlung mit hochkonzentriertem 35%igem Wasserstoffperoxid fest. Hierbei wurden Dentinpräparate präeruptiver dritter Molaren 30 Minuten mit 35% Wasserstoffperoxid, standardisiert mit 200 g Druck und 50 Umdrehungen/min, geputzt. Die Kontrollgruppe wurde 30 Minuten lang mit Wasser geputzt. Auch die Dentinproben, die 30 Minuten lang mit 35% Wasserstoffperoxid gebleicht wurden und anschließend eine Minute lang mit Zahnpasta geputzt wurden, zeigten im Vergleich zu ihrer Kontrollgruppe, die 30 Minuten lang in Wasser gelagert und anschließend eine Minute geputzt wurde, keine signifikanten Unterschiede im Abrasionsgrad (SULIEMANN et al. 2004a).

Obwohl die Auswirkung von Bleichmitteln auf die Oberflächenhärte der Zahnhartsubstanz ein bereits weiträumig untersuchtes Gebiet ist, gibt es nach wie vor

Unstimmigkeiten über die Ergebnisse. SULIEMANN konnte in seinem oben aufgeführten Versuch nachweisen, dass die Dentinhärte sich nach einer 30-minütigen Bleichtherapie mit 35%igem Wasserstoffperoxid nicht signifikant reduziert. Auch in Studien, die mit unterschiedlichen Konzentrationen und Einwirkzeiten von Wasserstoffperoxid (6-35%) und Carbamidperoxid (10-35%) als Bleichmittel experimentierten, zeigten sich keine Veränderungen in der Mikrohärtigkeit der Dentinoberfläche (BASTING et al. 2001; JOINER et al. 2004; KOZAK et al. 2001; UNLU et al. 2004; WHITE et al. 2001).

Gegensätzliches konnte PECORA 1994 nachweisen. In seinem In-vitro-Versuch lag nach 72-stündiger Bleichtherapie mit 30% Wasserstoffperoxid eine signifikante Reduktion der Mikrohärtigkeit des Dentins vor. Auch CHNG konnte dieses Ergebnis mit 30%igem Wasserstoffperoxid und 24 Stunden Einwirkzeit bestätigen (CHNG et al. 2005). Jedoch lag in beiden Studien der pH-Wert der Bleichmittel bei 2, was den kritischen Wert für Wurzeldentin von 6-6,8 (HOPPENBROUWERS et al. 1986) weit unterschreitet. Demzufolge findet eine allmähliche Demineralisation der Apatitkristalle statt (ATTIN et al. 2003; KLIMEK 1997). Die signifikante Abnahme der Mikrohärtigkeit wird somit nicht dem Bleichmittel selbst, sondern dem niedrigen pH-Wert zugeschrieben, der die anorganischen Bestandteile des Dentins beeinflusst (PECORA 1994).

Bleichmittel zeigen nicht nur einen Effekt auf die anorganische Zusammensetzung und Struktur des Dentins, sondern beeinflussen auch die organische Komponente. ROTSTEIN konnte in seinen Studien eine Denaturierung der im Dentin enthaltenen Kollagenfasern nach einer Bleichtherapie beobachten (ROTSTEIN et al. 1992; 1996).

Andere Studien zeigten, dass die Veränderung der Mikrohärtigkeit an der Zahnhartsubstanz kein persistierender Zustand sein muss. Nach einer Remineralisationsphase kann die initial reduzierte Härte auf die ursprünglichen Werte wiederhergestellt werden (DE FREITAS et al. 2004a; 2004b). Diesen Effekt konnten auch LEWINSTEIN et al. 2004 in ihrem In-vitro-Versuch beobachten. Dabei wurden Dentinproben mit 35%igem Wasserstoffperoxid, 35%-, 15%-, und 10%igem

Carbamidperoxid gebleicht und anschließend die Knoop-Härte ermittelt. Werden die gebleichten Dentinproben anschließend für 5 Minuten in 0,05%iger Fluoridlösung getränkt, stellt sich die vorerst abgenommene Mikrohärtigkeit wieder ein und erreicht sogar eine höhere Knoop-Härte, als den ursprünglichen Ausgangswert. Auch die Verwendung von 15%igem Carbamidperoxid mit 0,11%iger Fluoridzusatzung (*Opalescence F*) kann im Vergleich zu nicht-fluoridhaltigen Bleichmitteln die Abnahme der Knoop-Härte von Dentin reduzieren.

Zusammenfassend haben sich bereits viele Autoren mit den Wechselwirkungen der Peroxide in Bleichmitteln mit der Zahnhartsubstanz beschäftigt, jedoch liegen hinsichtlich der klinischen Relevanz keine eindeutigen Ergebnisse vor. Diese Variationen können aus unterschiedlich aufgebauten Versuchsdesigns resultieren. So können Differenzen in der Materialwahl, Bleichmittelkonzentration, Einwirkzeit und Auswertungsmethode zu unterschiedlichen Resultaten führen.

#### **4.6 Klinische Vorgehensweise des internen Bleachings (ATTIN 2009)**

Das interne Bleichen avitaler Zähne wird auch als Walking-Bleach-Technik bezeichnet, da das Bleichmittel während der Einwirkzeit von einigen Tagen im ausgehöhlten Pulpecavum unter dichtem Verschluss verbleibt.

##### **Vorbereitung**

Voraussetzung für eine erfolgreiche zahnärztliche Bleichtherapie ist eine ausgiebige Anamnese und Befundung (dental, endodontisch, parodontal). Dabei ist die Identifikation der Zahnverfärbung und ihrer Ursache essentiell. Auch die Erstellung eines Röntgenbildes kann hilfreich sein, um Kenntnisse über die apikalen Verhältnisse zu gewinnen und mögliche Resorptionen frühzeitig zu erkennen oder eine bereits vorhandene Wurzelkanalfüllung qualitativ zu beurteilen. Insuffiziente Restaurationen oder Wurzelkanalbehandlungen sollten vor Beginn der Bleichtherapie ausgetauscht werden, um eine Penetration des Bleichmittels in das umliegende Gewebe zu verhindern. Zusätzlich muss der Patient über die Erfolgschancen, Risiken und Alternativtherapien aufgeklärt werden.

## **Aufbereitung der Zugangskavität**

Nachdem Cofferdam und eine Zugangskavität gelegt sind, werden nur grobe färbende Stoffe, wie z.B. nekrotische Gewebereste, Karies und Wurzelfüllmaterialien manuell oder maschinell entfernt. Die Zahnhartsubstanz soll weitgehend geschont werden, um das Frakturrisiko des Zahnes zu minimieren. Liegt eine suffiziente Wurzelkanalfüllung vor, wird diese auf 2 mm unter Schmelz-Zement-Grenze reduziert und mit einer koronalen Abdichtung aus Glasionomermaterial bedeckt. Diese Unterfüllung hat die Aufgabe, eine Diffusion des Bleichmittels in das zervikale und apikale Parodont zu verhindern und somit mögliche Nebenwirkungen und Irritationen zu vermeiden. Zu beachten ist die Lage dieser Unterfüllung, die streng subgingival verlaufen soll, da es ansonsten in diesen Bereichen zu Persistenz der Verfärbung im zervikalen Kronenbereich kommen kann.

## **Einbringung des Bleichmittels**

Für die Walking-Bleach-Technik wird die Verwendung von Natriumperborat empfohlen, aber auch Wasserstoffperoxid oder Carbamidperoxid können verwendet werden.

Sind die Vorbereitungen der Zugangskavität getroffen, kann das Bleichmittel nach Herstellerangaben in die Kavität eingebracht werden. Im Falle des Bleichmittels Natriumperborat werden gute Ergebnisse bei der homogenen Anmischung des Pulvers im Verhältnis 2:1 mit Aqua dest. oder 3% Wasserstoffperoxid erzielt.

Das Bleichmittel verbleibt 5-7 Tage im Zahn und wird mit einem dichten provisorischen Verschluss versehen. Empfohlen werden dazu adhäsive Komposite oder Kompomere. Ist nach der ersten Sitzung der gewünschte zahnauhellende Effekt noch nicht erreicht, kann ein Wechsel der Bleicheinlage vorgenommen werden, bis das gewünschte Resultat erreicht ist.

## **Definitive Versorgung**

Aufgrund von Peroxid- und Sauerstoffresten, die sich nach dem Bleaching-Prozess an der Dentinwand befinden, wird die Haftung von Kompositen zur Zahnhartsubstanz reduziert und die Dichtigkeit der Füllung geschwächt. Somit werden das Risiko des erneuten Einwanderns von Farbpigmenten und die Entstehung von Rezidiven gefördert. Daher wird empfohlen, im Anschluss an die Bleichtherapie einen Zeitraum von 2-3 Wochen abzuwarten, bevor ein definitiver adhäsiver Kompositverschluss des Pulpenkavums unternommen wird. Um diese Wartezeit zu reduzieren, kann mit Natriumhypochlorit zwischengespült werden, damit die überschüssigen Peroxide aufgelöst werden.

### **4.6.1 Komplikationen und Nebenwirkung durch die Walking-Bleach-Technik**

Neben den in Kapitel 4.6 *Klinische Vorgehensweise des internen Bleachings* beschriebenen chemischen Einflüssen der Bleichmittel auf die Zahnhartsubstanz, kann auch die mechanische Eigenschaft des Zahnes während der Bleichtherapie beeinflusst werden.

Das erneute Anlegen und Aufbereiten der Zugangskavität für eine Bleichtherapie induziert einen vermehrten Verlust der Zahnhartsubstanz und erhöht die Anfälligkeit für Zahnfrakturen. Auch während der Einwirkzeit des Bleichmittels im hohlen Pulpenkavum liegt ein erhöhtes Frakturrisiko vor, da eine interne adhäsive Stabilisierung fehlt.

Wird aber bei der Vorbereitung der Zugangskavität minimalinvasiv vorgegangen und der Zahn während der Einwirkzeit des Bleichmittels vor starken Belastungen geschont, kann die Frakturgefahr vermindert werden (BARATIERIE et al. 1995). Auch die nachfolgende, definitive, koronale Versorgung spielt eine Rolle für den Langzeiterfolg eines intern gebleichten Zahnes. Ist diese adäquat angelegt, besteht kein erhöhtes nachfolgendes Risiko (AZEVEDO et al. 2011).

So liegt das erhöhte Frakturrisiko nicht an der Struktur der Hartsubstanz endodontisch behandelter oder intern gebleichter Zähne, sondern an der Instabilität,



die mit einem erhöhten Substanzverlust dieser beiden Therapien einhergeht (ATTIN et al. 2004; PAPA et al. 1994).

Eine weitere Komplikation des internen Bleichens stellt die zervikale Wurzelresorption dar. Die genaue Ätiologie dieses Prozesses ist noch nicht eindeutig geklärt (ZIMMERLI et al. 2010), aber der interne Bleichprozess kann neben kieferorthopädischer Behandlung und Trauma als einer der prädisponierenden Faktoren angesehen werden (RATHE et al. 2006). Durch Penetration der Peroxide vom Pulpenkavum durch die Zahnhartsubstanz in den Parodontalraum hinein tritt unterhalb des epithelialen Attachments die Resorption auf (ANDREASEN et al. 1981; ROTSTEIN et al. 1991a; TRONSTAD 1988).

Um mögliche zervikalen Resorptionen der Zahnhartsubstanz vorzubeugen, wird empfohlen, das Wurzelfüllmaterial koronal bis zum Gingivaniveau mit Glasionomerzement abzudecken (DIETSCHI 2006; SMITH et al. 1992). Weiter wird empfohlen, bei der Walking-Bleach-Technik Natriumperborat als Bleichmittel zu verwenden (MADISON et al. 1990) und dabei auf eine thermokatalytische Aktivierung zu verzichten (ATTIN et al. 2003; FRIEDMAN 1997). Zusätzlich kann im Anschluss an die Bleichtherapie eine Kalziumhydroxid-Einlage im Pulpenkavum der zervikalen Wurzelresorption entgegenwirken. Kalziumhydroxid ist in der Lage, den niedrigen pH-Wert, der während der Bleichtherapie entsteht, zu neutralisieren (KEHOE 1987).

#### **4.7 Befestigungskomposit**

Für die Befestigung von Wurzelstiften kommen Befestigungszemente und Befestigungskomposite in Frage.

Die gebräuchlichsten Befestigungszemente sind Glasionomerzemente (GIZ), die durch eine Säure-Base-Reaktion aushärten. GIZ bestehen aus einer flüssigen Komponente (Polycarbonsäure) und einem Pulveranteil (Kalzium-Aluminium-Silikatglas mit Anteilen aus Kalziumfluorid). Vorteile gegenüber den Befestigungskompositen ist die unempfindlichere Handhabung in Bezug auf die Feuchtigkeitsanfälligkeit. Auch sind GIZ in der Lage, eine direkte chemische

Verbindung mit der Zahnhartsubstanz einzugehen und benötigen somit keiner zusätzlichen Konditionierung (VAN MEERBEEK et al. 1992).

Die in dieser Studie verwendeten Befestigungskomposite *BiFix SE* und *Rebilda DC* sind dualhärtend. Die Dualhärtung ist eine Kombination aus chemischer Härtung und Lichthärtung. Komposite mit chemischer Aushärtung bestehen aus einem 2-Komponenten-System, entweder als Paste-Paste oder Pulver-Flüssigkeit. Durch eine Redoxreaktion zwischen dem Akzelerator (tertiäres Amin) und Initiator (Benzoylperoxid) entstehen freie Radikale, welche die Polymerisationsreaktion in Gang setzten (EICHNER et al. 2000). Die Lichtaushärtung der Komposite wird durch Energie von Licht mit bestimmter Wellenlänge (400-500 nm) induziert. Dabei wird der Photoinitiator (Kampferchinon) aktiviert, der in Radikale zerfällt und somit die Polymerisation startet (HELLWIG et al. 2009).

#### **4.7.1 *BiFix SE***

*BiFix SE* (VOCO) ist ein selbstadhäsives, dualhärtendes Befestigungskomposit, das in einer Doppelkammer-Spritze angeboten wird. Die Indikationen sind Befestigungen von indirekten Restaurationen wie Inlays, Onlays, Kronen und Brücken aus Metall, Keramik und Komposit sowie Stiften aus Metall, Keramik und faserverstärkt.

Seine Bestandteile setzen sich aus folgenden Materialien zusammen:

- bifunktionelle Methacrylate
- saure Methacrylate
- alipathische Methacrylate
- aromatische Methacrylate
- Benzoylperoxid
- Amine Butylhydroxytoluol
- BisGMA
- anorganische Füllstoffe

Die Verarbeitungszeit beträgt 2 Minuten bei einer Temperatur von 23°C und eine Abbindezeit von 4 Minuten bei 37°C. Nach Einsetzen der Restauration oder des Stiftes liegt die intraorale Verarbeitungszeit bei 30-60 Sekunden (VOCO Gebrauchsanweisung).

Durch die sauren Methacrylate ist *BiFix SE* in der Lage, eine Ätzung der Zahnhartsubstanz und somit die Demineralisierung zu erzielen (DE MUNCK et al. 2004). Zusätzlich stellen diese auch den chemischen Verbund zur Dentinoberfläche her, indem eine Reaktion zwischen ihrer negativen Ladung und den positiv geladenen Kalziumionen der Zahnhartsubstanz stattfindet (GERTH et al. 2006).

#### **4.7.2 *Rebilda DC/ Futurabond U***

*Rebilda DC* (VOCO) ist ebenfalls ein dualhärtendes Komposit, jedoch wird ein zusätzliches Adhäsivsystem (*Futurabond U*, VOCO) benötigt.

Neben den dualhärtenden Eigenschaften ist es zusätzlich fließfähig und fluoridhaltig. Sein Anwendungsgebiet beinhaltet die Befestigung von faserverstärkten Wurzelstiften aus Komposit und den Stumpfaufbau von de- und vitalen Zähnen.

Seine Bestandteile:

- Bis-GMA
- UDMA
- DDDMA
- Füllstoffe
- Initiatoren
- Stabilisatoren

Das dazugehörige All-in-One-Universaladhäsiv *Futurabond U* ist ebenfalls dualhärtend und selbstätzend. Es kann aber auch in Kombination mit anderen Ätztechniken angewendet werden wie Self-, Selective-, oder Total-Etch. *Futurabond U* wird in Form eines Einmal-Applikationssystems, der Single Dose, verwahrt und erst kurz vor Gebrauch angemischt (VOCO Gebrauchsanweisung).

## 4.8 Konditionierung von Wurzelkanalstiften

Eine irreversible Pulpaschädigung stellt laut der DGZMK (Stellungnahme von 2001) die eindeutige Indikation für eine Wurzelkanalbehandlung. Wie der Zahn anschließend postendodontisch versorgt werden soll, ist sowohl abhängig von der Qualität, wie auch der Quantität der verbleibenden Zahnhartsubstanz. Steht nicht genügend Restsubstanz für eine rein adhäsive Rekonstruktion oder Überkronung zur Verfügung, kann die Indikation für den Einsatz eines Wurzelstiftes gestellt werden (DIETSCHI et al. 2007; FERNANDES et al. 2001; SCHWARTZ et al. 2004; SMITH et al. 1997). Der Wurzelstift soll als Retention für koronale Aufbauten dienen und nicht, wie damals fälschlich angenommen, eine Stabilisation des geschwächten Zahnes bieten (ATTIN et al. 1994). Voraussetzung für eine erfolgreiche und langzeitstabile rekonstruktive Maßnahme ist unter anderem ein dauerhafter, dichter Halt zwischen den einzelnen Komponenten des Verbundsystems Wurzelstift-Adhäsiv-Wurzelkanalentin (MONTICELLI et al. 2005). Es können makro-, mikromechanische und chemische Oberflächenbehandlungen sowie spezifische Adhäsion genutzt werden, um eine erhöhte Haftung zwischen den Materialien zu erreichen.

Durch den mechanischen Prozess der Sandstrahlung mit Korund oder chemischen Ätzung wird ein mikroretentives Muster auf der Materialoberfläche geschaffen (JANDA 1992; MONTICELLI et al. 2006; 2008), welches die retentive Haftung mehr als verdoppeln kann (NERGIZ et al. 1997). Zusätzlich wird eine Oberflächenvergrößerung geboten, wodurch die chemische Adhäsion über eine erhöhte Benetzbarkeit des Materials unterstützt wird (TILLER et al. 1985). Eine gute Benetzbarkeit erhöht den spaltfreien Kontakt zwischen Haftvermittler und Stiftoberfläche (JANDA 1992).

Um eine Adhäsion zwischen Befestigungskomposit und Wurzelstift zu ermöglichen, muss die Stiftoberfläche vorerst durch Silikatisierung (chemomechanisch) und Silanisierung (chemisch) konditioniert werden. Der Begriff der Adhäsion wird von WEISSMANTEL 1982 wie folgt definiert:

„Unter Adhäsion versteht man die Wechselwirkung eines festen Körpers mit größeren Partikeln oder kompakten flüssigen oder festen Phasen, die zu einer Haftung der Partikel oder Phasen an der festen Oberfläche führt.“

Die Silikatschicht dient als Haftvermittler an der Metalloberfläche, um einen Verbund mit dem angewendeten Kunststoff zu ermöglichen (GUGGENBERGER 1989; VALANDRO et al. 2006; WILMSHÖFER 1990). Dazu wird die Spreaderoberfläche mit Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) abgestrahlt. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit entstehen Energien im Aufprallbereich, die den Schmelzprozess der Siliziumdioxidpartikel in die Stiftoberfläche induzieren. So geht das Strahlgut eine chemische Reaktion mit der Spreaderoberfläche ein und kann nach dem Silanisierungsprozess eine chemische Verbindung mit dem Befestigungskunststoff eingehen (VALANDRO et al. 2006). Dieser Vorgang wird als tribochemischer Prozess bezeichnet.

Die anschließende Silanschicht dient der chemischen Adhäsion zwischen der anorganischen  $\text{SiO}_2$ -Schicht und den organischen Kompositanteilen und fungiert somit als Zwittermolekül (MATINLINNA et al. 2004). In der Zahnmedizin werden hauptsächlich 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilane ( $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_5\text{Si}$ ) verwendet (PERDIGAO et al 2006). Diese besitzen einen organischen Rest und eine Alkoxy-Gruppe, die durch Alkoholabspaltung mit den Hydroxylgruppen der  $\text{SiO}_2$ -Schicht reagieren. Der Verbund mit dem Komposit läuft über den organischen Rest des Silans ab (MATINLINNA et al. 2004).



**Abb. 2:** Bestandteile der Stiftzementierung

## 5 Versuchsplanung und Zielsetzung

In dieser In-vitro-Studie sollen die möglichen Wechselwirkungen zwischen dem internen Bleichprozess des Wurzelkanal Dentins und den Befestigungskompositen untersucht werden. Zusätzlich soll die Frage geklärt werden, inwiefern sie den Haftverbund nachhaltig beeinflussen.

Insgesamt wurden hierzu 70 humane Zähne ohne endodontische Vorbehandlung ausgesucht. Der Wurzelkanal sollte möglichst gerade und einwurzelig verlaufen und der Querschnitt rund sein.

Um später eine sinnvolle Vergleichbarkeit der Testgruppen zu erreichen, war für alle Zähne eine identische apikale Aufbereitung von ISO 60 vorgesehen. Nach koronaler Einkürzung auf 10 mm lag die identische Arbeitslänge aller 70 Versuchszähne bei 8 mm.

Vorerst wurden die Wurzelkanäle mithilfe von Feilen manuell aufbereitet, damit anschließend eine maschinelle Aufbereitung mit dem *BioRaCe*-System (FKG Dentaire SA) auf die ISO-Größe 60 bei 2% Konizität (.02/#60) erfolgen konnte.

Nachdem die aufbereiteten Wurzelkanäle mit 3%iger NaOCl-Lösung gespült und getrocknet wurden, verblieb die Bleaching-Einlage 7 Tage im Wurzelkanal.

Nach abgeschlossener Einwirkdauer erfolgte die manuelle Entfernung des Bleaching-Materials mithilfe von Stahlfeilen ISO 35, ohne die Kanalwand durch Materialabrieb zu beeinflussen. Danach fand die Spülung des Wurzelkanallumens mit einem bestimmten Spülprotokoll statt. Zusätzlich wurde der *EndoActivator* (Dentsply) genutzt, der 30 Sekunden im Wurzelkanal aktiviert verblieb. Dies erhöht die vollständige Entfernung der Bleicheinlage aus dem Wurzelkanal.

Nach Trocknung mittels Papierspitzen ISO 35 (Roeko) wurden die vorher konditionierten und angepassten Stahlspreader mit der ISO-Größe 55 bei 2% Konizität (.02/#55) mit dem entsprechenden Kompositmaterial nach Herstellerangaben eingebracht. Auch hier wurde eine Wartezeit von 14 Tagen eingehalten, um

ein vollständiges Dunkelaushärten des Befestigungskomposits im gesamten Wurzelkanal zu gewährleisten.

Abschließend wurden die Zähne in eine Zwick-Universalprüfmaschine eingespannt und die verklebten Stahlspreader mittels Pull-out-Versuch aus den Testzähnen gezogen, wobei die angewandte Kraft dokumentiert wurde. Die Auswertung der einzelnen Spreader erfolgte dann visuell. Im Anschluss wurde die statistische Auswertung durchgeführt.

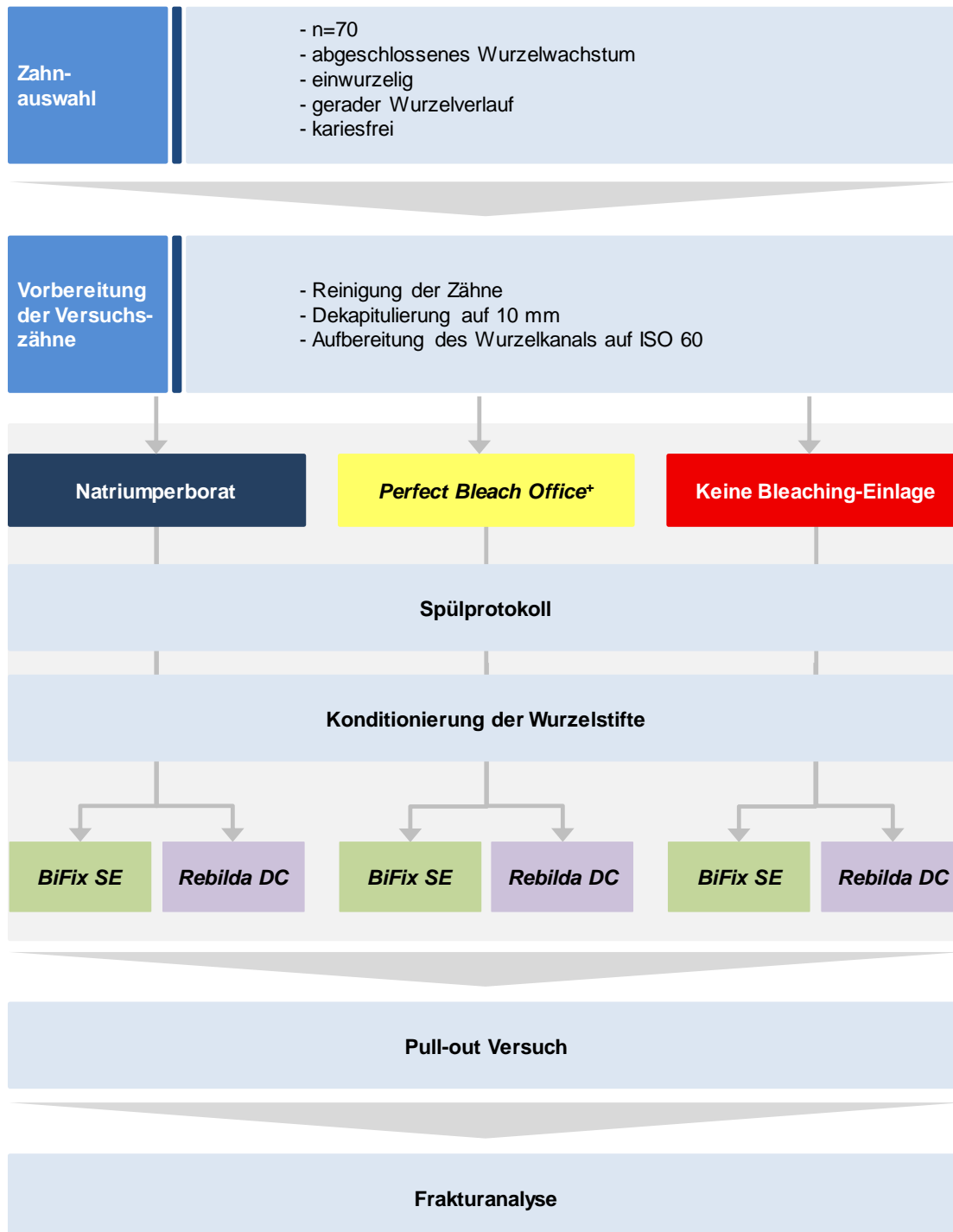
## **5.1 Hypothesen**

Folgende Hypothesen sollen überprüft werden:

**1. Verschiedene interne Bleaching-Einlagen führen zu Unterschieden im Haftverbund der verschiedenen Befestigungskomposite im Wurzelkanalentin.**

**2. Komposite mit integriertem Adhäsivsystem weisen keinen besseren Haftverbund im Vergleich zu Kompositen mit externem Adhäsivsystem auf.**

## 6 Material und Methode



**Abb. 3:** Flowchart des Versuchdesigns



## 6.1 Auswahl und Vorbereitung der Versuchszähne

Vor Versuchsbeginn wurden alle Zähne, die in gesättigter Thymol-Lösung (Merck) gelagert wurden, von Geweberesten und Konkrementen gereinigt. Dazu wurde auf eine rotierende Bürste mit grünem Winkelstück (*INTRAmatic LUX 3*, Fa. KaVo), sowie Handscalern (Hu-Friedy, Leimen) zurückgegriffen.

Folgende Kriterien mussten bei der Auswahl der Testzähne erfüllt werden:

Es sollte ein einwurzeliger Zahn mit möglichst geradem Wurzelverlauf und rundem Kanallumen sein. Dabei durfte die Zahnwurzel die Länge von 10 mm nicht unterschreiten, da alle Proben nach Dekoronation die identische Länge von 10 mm aufweisen sollten, um ein vergleichbares Aufbereiten und Reinigen der Wurzelkanäle sowie die Passung der konformen Stahlspreader zu gewährleisten. Weitere Kriterien waren ein abgeschlossenes Wurzelwachstum, keine Schäden am Apex und keine endodontische Vorbehandlung an den Wurzelkanälen.

Um sicher zu stellen, dass diese Kriterien erfüllt wurden, sollten vorab alle potenziellen Versuchszähne geröntgt und dokumentiert werden. Die Lagerung der ausgewählten Zähne erfolgte dann in gesättigter Thymol-Lösung.

Im Anschluss erfolgte eine einheitliche koronale Dekapitulierung aller 70 Versuchszähne auf 10 mm vom Apex mithilfe einer diamantierten Trennscheibe (Komet) unter Wasserkühlung.

Die Kanäle wurden auf ihre Gängigkeit mittels *C-Feilen* (VDW) ausgetastet und ein Gleitpfad durch drucklose manuelle Instrumentierung mit *K-Bohrern* bis ISO 15 erschaffen. Die weitere Aufbereitung erfolgte maschinell über die *BioRaCe*-Bohrer bis ISO 60 bei 2% Konizität (.02/#60). Unter ständiger Spülung mit 3%iger NaOCl-Lösung und Rekapitulation mittels *C-Feile* ISO 15 wurde eine Verblockung des Wurzelkanales verhindert. Um nach identischer Aufbereitung aller 70 Versuchszähne kontrollieren zu können, ob die Versuchszähne 1 mm vor Apex eine endgültige Arbeitslänge von 8 mm erreicht haben, wurden diese erneut geröntgt.

Die weitere Lagerung der nun aufbereiteten Versuchszähne erfolgte in mit Aqua

dest. gefüllten *Eppendorf*-Gefäßen (Eppendorf AG), um das feuchte Milieu der Mundhöhle zu imitieren.

## 6.2 Bleaching-Einlage

Die randomisierte Zuteilung der vorbereiteten Versuchszähne auf die zwei zu untersuchenden Bleaching-Materialien setzte sich wie folgt zusammen:

Natriumperborat	Gruppe A (n=24)
Perfect Bleach Office <sup>+</sup>	Gruppe B (n=24)
Keine Bleaching-Einlage	Gruppe C (n=22)

**Tab. 2:** Übersicht der gebleichten Testgruppe

### Natriumperborat

Natriumperborat (Sigma-Aldrich) wird in Form eines unlöslichen grobkörnigen Pulvers hergestellt. Bevor es als Bleichmittel in den Wurzelkanal eingebracht werden konnte, musste es zunächst mit destilliertem Wasser vermengt werden. Dabei sollten die großen Körner so gut wie möglich klein gestampft werden, um eine homogene Pastenkonsistenz zu erhalten. Die daraus resultierende Suspension wurde anschließend als internes Bleichmittel verwendet und in den gesamten Wurzelkanal mittels *C-Feile* ISO 15 eingebracht. Als zusätzliches Hilfsinstrument diente eine *Explorersonde*, die durch Druck von koronal das Bleichmittel komprimierte und somit eine gleichmäßige Füllung des Wurzelkanals ermöglichen sollte.

### Perfect Bleach Office<sup>+</sup>

Im *Perfect Bleach Office<sup>+</sup>* (Voco) liegt das Bleichmittel auf Wasserstoffperoxidbasis als zweiphasiges Gel in einer 4:1 Doppelspritze vor.

Neben 35%igem Wasserstoffperoxid, enthält *Perfect Bleach Office<sup>+</sup>* Kaliumnitrat,

Natriumfluorid, Natriumhydroxid, Glycolderivate, Verdickungsmittel und Farbstoff.

Bevor das Material aus der Kartusche in den gesamten Wurzelkanal eingebracht wurde, musste die initiale, frisch angemischte Menge des Gels vorerst verworfen werden, bis ein gleichmäßig gefärbtes Gel aus der Kanüle austrat. Um sicher zu stellen, dass das Bleaching-Material den Wurzelkanal vollständig ausfüllte, wurde mithilfe eines Spreaders das Gel in die apikalen, schwer zugänglichen Bereiche verteilt.

Nachdem die zwei verschiedenen Bleichmittel in 48 Testzähne eingebracht wurden, wurden die Kanäleingänge mit Boxing-Wachs verschlossen, um ein Herauswaschen des Materials zu verhindern. Die Bleaching-Einlage wurde 7 Tage im Wurzelkanal belassen, um eine ausreichende Wirkung auf die Zahnhartsubstanz sicherzustellen.

Zusätzlich wurde eine 3. Testgruppe mit 22 Versuchszähnen als Referenzgruppe angelegt, die kein Bleaching-Material im Wurzelkanal enthielt.

Alle 70 Versuchszähne der 3 Versuchsgruppen wurden während der Einwirkzeit von 7 Tagen in mit Aqua dest. gefüllten Eppendorf-Gefäßen bei Zimmertemperatur feucht gelagert.

### **6.3 Spülprotokoll**

Nach einer Einwirkzeit von 7 Tagen wurde die Bleicheinlage aus dem Wurzelkanal der Versuchszähne entfernt. Dafür wurden zunächst manuell mithilfe einer *C-Feile* ISO 35 grobe Überreste des Bleichmittels entfernt, ohne die Kanalwand durch Abrieb zu beeinflussen.

Anschließend wurden die Kanäle der Versuchszähne sorgfältig von den Resten des Bleichmaterials gereinigt, indem einheitlich mit einem bestimmten Spülprotokoll gespült wurde (**Tab. 3**). Zu Referenzzwecken wurde bei Versuchsgruppe C bis auf den Verzicht des Bleichmaterials bei den nachfolgenden Schritten gleichermaßen verfahren.

Das für alle Versuchsgruppen standardisierte Spülprotokoll setzte sich wie folgt zusammen:

Spülschritt	Spüllösung	Menge (ml)	Aktivierung mit EndoActivator	Aktivierungszeit (Sek)
1	Aqua dest.	0,5	Aktivierung	30
2	Aqua dest.	0,5	Aktivierung	30
3	Aqua dest.	0,5	Aktivierung	30
4	Aqua dest.	1	keine Aktivierung	-

**Tab. 3:** Verwendetes Spülprotokoll

Nach intensiver Spülung wurden die Wurzelkanäle aller Zähne erneut auf Gängigkeit und somit auf eine erfolgreiche Spülung überprüft, indem mit einer *C-Feile* ISO 08 der Wurzelkanal sondiert wurde.

Abschließend wurden die Kanallumen mittels Papierspitzen ISO 35 getrocknet, bevor die angepassten Spreader mit Befestigungskomposit eingebracht wurden.

## 6.4 Konditionierung der Spreader

Bevor die Stahlspreader ISO-Größe 55 (Dentsply DeTrey) mit dem entsprechenden Befestigungskomposit in die aufbereiteten Wurzelkanäle eingebracht wurden, mussten sie vorab angepasst und konditioniert werden.

Die Spreader erhielten von der Spitze an mithilfe der sogenannten *Gutta-Gauge* (Dentsply), einer Messlehre, gemessen bei 8 mm, eine unverschiebbliche Gummimarkierung. Somit konnte beim Füllen des Wurzelkanals sichergestellt werden, dass der Spreader die volle Arbeitslänge von 8 mm erreichte. Zusätzlich sollten die Stahlspreader bei Erreichen der Arbeitslänge im Wurzelkanal eine apikale Klemmpassung, auch 'Tug-back' genannt, vorweisen.

Konditioniert wurde die Metalloberfläche der Spreader durch Sandstrahlung mit Aluminiumoxidpartikel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bei einem Druck von 3 bar. Um die Benetzbarkeit der Metalloberfläche zu verbessern, wurde diese zusätzlich mit Alkohol (Hoffman & Sommer) gereinigt. In einem zweiten Schritt wurde eine Silikatschicht im *Rocatec*-

Verfahren mithilfe des *Rocatectors* (3M Espe) auf die Spreader bei 2,8 bar aufgebracht.

Kurz vor Einbringen der angepassten, gereinigten und silikatisierten Stahlspreader in die Wurzelkanäle wurden diese mit dem Silanfluid *Monobond S* (Ivoclar Vivadent) konditioniert. Mithilfe einer Microbrush wurde eine dünne Schicht auf die Stahlspreader aufgetragen und nach 60 Sekunden Einwirkzeit gleichmäßig verblasen.

## 6.5 Befestigung der Spreader mittels Sealer

Die Spreader sollten nur kurze Zeit nach Spülung und Trocknung der Wurzelkanäle eingebracht werden, da die Dentinoberfläche in diesem Zustand optimal vorbereitet war. Dazu wurden jeweils die Hälfte der Proben der 3 Versuchsgruppen dem Befestigungskomposit 1 (*BiFix SE*) und 2 (*Rebilda DC*) zugeteilt. Somit entstanden 6 Gruppen.

	BiFix SE	Rebilda DC
Natriumperborat	Gruppe A1	Gruppe A2
Perfect Bleach Office <sup>+</sup>	Gruppe B1	Gruppe B2
Keine Bleaching-Einlage	Gruppe C1	Gruppe C2

**Tab. 4:** Übersicht der experimentellen Gruppen

### Versuchsgruppe *BiFix SE*

*BiFix SE* wurde in einer Zwei-Pasten-Spritzenvorrichtung mittels Anmischkanüle "Typ 15" direkt in den Wurzelkanal eingebracht. Dazu wurde vorerst die erstgeförderte Menge des Kompositgemisches verworfen, um ein optimales Mischverhältnis beider Komponenten zu erreichen. Mithilfe einer ISO 35 *C-Feile* wurde der Befestigungszement auch in den apikalsten Teil des Wurzelkanals verteilt. Der angepasste und frisch silanisierte Stahlspreader wurde ebenfalls mit *BiFix SE* benetzt, bevor er mit leichtem Druck in den Wurzelkanal eingeführt wurde.

Großvolumige Kompositüberschüsse wurden mithilfe eines Schaumstoffpallets entfernt, kleinere wurden belassen.

### **Versuchsgruppe *Futurabond U + Rebilda DC***

*Rebilda DC* benötigt im Gegensatz zu *BiFix SE* ein zusätzliches Adhäsivsystem. Das dazugehörige Universaladhäsiv *Futurabond U* ist selbstätzend. Es handelt sich um einen Blister mit Zweikammersystem, welches erst kurz vor Gebrauch aktiviert wird. Beide Adhäsivkomponenten wurden miteinander vermengt, indem der Inhalt der vorderen Kammer in die hintere gedrückt wurde. Mithilfe des *Single Tim* Applikators (Voco) wurde die Flüssigkeit in der hinteren Kammer vermischt, bis keine Schlieren mehr zu sehen waren.

Das frisch angemischte Dentaladhäsiv wurde mit demselben Applikator in den Wurzelkanal eingebracht und 20 Sekunden lang einmassiert, bevor die Adhäsivschicht für 10 Sekunden gleichmäßig verblasen wurde. Gleichmaßen wurde mit dem Stahlspreader vorgegangen, bevor dieser im Kanal verklebt wurde. Anschließend wurde nach Herstellerangaben *Rebilda DC* in den Wurzelkanal eingebracht.

Alle 70 gefüllten Versuchszähne wurden nach Ablauf der Aushärtezeit zur Kontrolle der Wurzelfüllung geröntgt. Überprüft wurde, ob Randspalten und Unregelmäßigkeiten vorlagen und die gewünschte Arbeitslänge von 8 mm erreicht worden ist. Die 14-tägige Lagerung der gefüllten Zähne erfolgte in *Eppendorf*-Gefäßen mit Aqua dest. benetztem Schaumstoffpellet. In diesem feuchten Milieu erfolgte die Dunkel-aushärtung.

## 6.6 Messreihe

Am Ende der Lagerzeit wurden die Proben in einem genormten Standardverfahren der Werkstoffprüfung mittels Zwick-Universalprüfmaschine (Zwick, Ulm, Deutschland) untersucht, wobei die Auszugsfestigkeit des Spreaders, bzw. der Haftverbund zwischen Komposit zur Wurzeldentinoberfläche getestet wurde.

Insgesamt wiesen die Spreader eine Länge von 20 mm auf. Die apikalen 8 mm dienten als Retention im Wurzelkanal, während der koronale Teil des Spreaders von der Versuchsanordnung in Anspruch genommen wurde.

In der Zugprüfmaschine wurde zuerst der koronale Teil des Spreaders an dem beweglichen Querhaupt eingespannt, bevor der Testzahn am starren Probenhalter befestigt wurde.

Der gleichmäßige Zug des Querhaupts entlang der Längsachse des Spreaders wurde mit geringer Kraftinduktion (2 mm/min) erhöht, bis es zum Versagen des Verbundsystems Wurzelkanaldentin-Befestigungskomposit-Spreader kam. Bei diesem Pull-out-Verfahren wurde die senkrecht zur Klebefläche angewandte Zugkraft bis zum Verlust der Adhäsion gemessen. Die ermittelten Haftwerte wurden computergestützt in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dokumentiert.

Folgende Einstellungen wurden an der Material-Prüfmaschine gewählt:

Einstellungen	Parameter
LE-Geschwindigkeit	300 mm/Min
Prüfgeschwindigkeit	2 mm/Min
Kraftabschaltsschwelle	50% F max
Kraftschwelle für Bruch	0,1 % F nom
Obere Kraftgrenze	2000 N
Messlänge Standardweg	50 mm

**Tab. 5:** Einstellung der Universalprüfmaschine

## **6.7 Auswertung der Frakturmodi**

Bei der Auswertung der Frakturmodi handelte es sich um eine qualitative und visuelle Analyse der Bruchflächen des Befestigungskomposits am dezementierten Stahlspreader.

Mittels Spiegelreflexkamera (Canon EOS 500D) mit angeschlossenem Micro-Objektiv (Canon MP-E 65) bei 3-facher Vergrößerung wurden fotografische Aufnahmen jedes aus dem Wurzelkanal gelösten Spreaders von zwei Seiten angefertigt. Danach wurden die bereits dokumentierten Zugkräfte aus dem Pull-out-Versuch ebenfalls visuell unter einem Lichtmikroskop analysiert.

## **6.8 Statistische Auswertung**

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurden die im Zugversuch ermittelten Daten statistisch ausgewertet. Dazu wurden sie unter Benutzung der Software SPSS Version 19.0 (IBM Inc.) erfasst. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p \leq 0,05$  festgelegt.

Ziel der statistischen Auswertung war es, zu überprüfen, ob signifikante Unterschiede zwischen dem Haftverbund der verschiedenen Befestigungskomposite bei Verwendung von zwei unterschiedlichen Bleichmitteln bestanden.

Überprüft wurden die Daten der Testgruppen mittels verschiedener statistischer Testverfahren.



## 7 Ergebnisse

Die Daten resultierten aus den im Pull-out-Versuch ermittelten Haftwerten und wurden mithilfe statistischer Testverfahren nachfolgend ausgewertet.

Insgesamt wurde der Auszugsversuch mit 70 Zähnen durchgeführt und ein dazugehöriges Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt. Die Studie wurde als 2x3 Design strukturiert. Die unabhängigen Variablen waren Komposit mit den Ausprägungen *BiFix SE* und *Rebilda DC* und Bleichmittel mit den Ausprägungen Natriumperborat, *Perfect Bleach Office+* sowie der Kontrollgruppe ohne Bleichmittel. In Tabelle 4 ist die Zusammensetzung der Versuchsgruppen aufgelistet.

### 7.1 Statistische Testverfahren

#### 7.1.1 Shapiro-Wilk-Test

Der Shapiro-Wilk-Test ist ein Signifikanztest und kann als Vortest angesehen werden. Mit seiner Hilfe ist es möglich, eine sinnvolle Auswahl der nachfolgenden statistischen Tests zu treffen, da er sich darauf beschränkt, zu ermitteln, ob eine Normalverteilung vorliegt oder nicht. Liegt eine Normalverteilung der Testwerte vor, werden parametrische Tests angewandt. Ist dies nicht gegeben, wird auf nicht-parametrische Tests zurückgegriffen.

Hierbei wird der Grad der Abweichung von einer Normalverteilung ermittelt. Liegt  $p \leq 0,05$  vor, weichen die Testergebnisse signifikant von der Normalverteilung ab.

Aufgrund der geringen Probenanzahl wurde der Shapiro-Wilk-Test bei dieser Untersuchung verwendet.

#### 7.1.2 Kruskal-Wallis-Test

Der Kruskal-Wallis-Test ist ein nicht-parametrischer Test und prüft auf Basis der Rangordnung, ob signifikante Unterschiede der Daten mehrerer Stichproben zwischen den verschiedenen Gruppen vorliegen.

Es handelt sich hierbei um einen Rangsummentest, der überprüft, ob die Rangwerte der Gruppen derselben Grundgesamtheit angehören.

In dieser Testreihe wird der Haftverbund bzw. die Pull-out-Kraft einzelner Befestigungskomposite bei zuvor mit unterschiedlichen Materialien gebleichten Wurzelkanälen untersucht.

### **7.1.3 Mann-Whitney-Test**

Der Mann-Whitney-Test ist, wie der Kruskal-Wallis-Test, ein nicht-parametrischer Rangsummentest. Während der Kruskal-Wallis-Test bei signifikanten Unterschieden nicht zeigt, welche Stichproben sich von den anderen abheben, sondern nur allgemein einen signifikanten Unterschied feststellen kann, vergleicht der Mann-Whitney-Test die zentralen Tendenzen zweier unabhängiger Stichproben miteinander. Dazu wird für alle Gruppen mit dem Mann-Whitney-Test gerechnet.

Ziel ist es, mithilfe des Mann-Whitney-Tests im Gruppenvergleich festzustellen, welche und inwiefern verschiedene Bleaching-Einlagen mit einer unterschiedlichen Haftfestigkeit von einzelnen Befestigungskompositen einhergehen. Das Signifikanzniveau liegt bei  $p \leq 0,05$ .

Die abhängige Variable muss auch bei diesem Test nicht in der Normalverteilung liegen, aber zumindest ordinalskaliert sein. Der Mann-Whitney-Test sollte daher auch bei intervallskalierten Daten eingesetzt werden, wenn die Voraussetzung der Normalverteilung nicht erfüllt wird.

## **7.2 Darstellung der Ergebnisse**

Statistisch sollte die Hypothese überprüft werden, ob sich verschiedene interne Bleaching-Einlagen auf den Haftverbund der Befestigungskomposite im Wurzelkanal dentin auswirken. Voraussetzung für parametrische Tests ist eine Normalverteilung, die mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests untersucht werden kann.

### 7.2.1 Shapiro-Wilk-Test

Laut Shapiro-Wilk-Test wiesen die Testergebnisse eine Normalverteilung in allen Gruppen auf, ausgenommen der Testgruppe 6 (**Tab. 6**). Hier ergab sich eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung ( $p \leq 0,05$ ) für die Gruppe C<sub>2</sub> (keine Bleaching-Einlage und *Rebilda DC* als Befestigungskomposit). Aufgrund der nicht erfüllten Voraussetzung für parametrische Tests wurde mit nicht-parametrischen Tests fortgefahren.

Versuchsgruppen	Mittelwert (M)	df	Signifikanzwert (p)
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)	0,922	12	0,306
<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)	0,900	12	0,159
<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)	0,890	12	0,119
<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)	0,983	12	0,992
<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)	0,926	11	0,377
<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	0,741	11	<b>0,003</b>

**Tab. 6:** Auswertung des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung der Versuchsgruppen

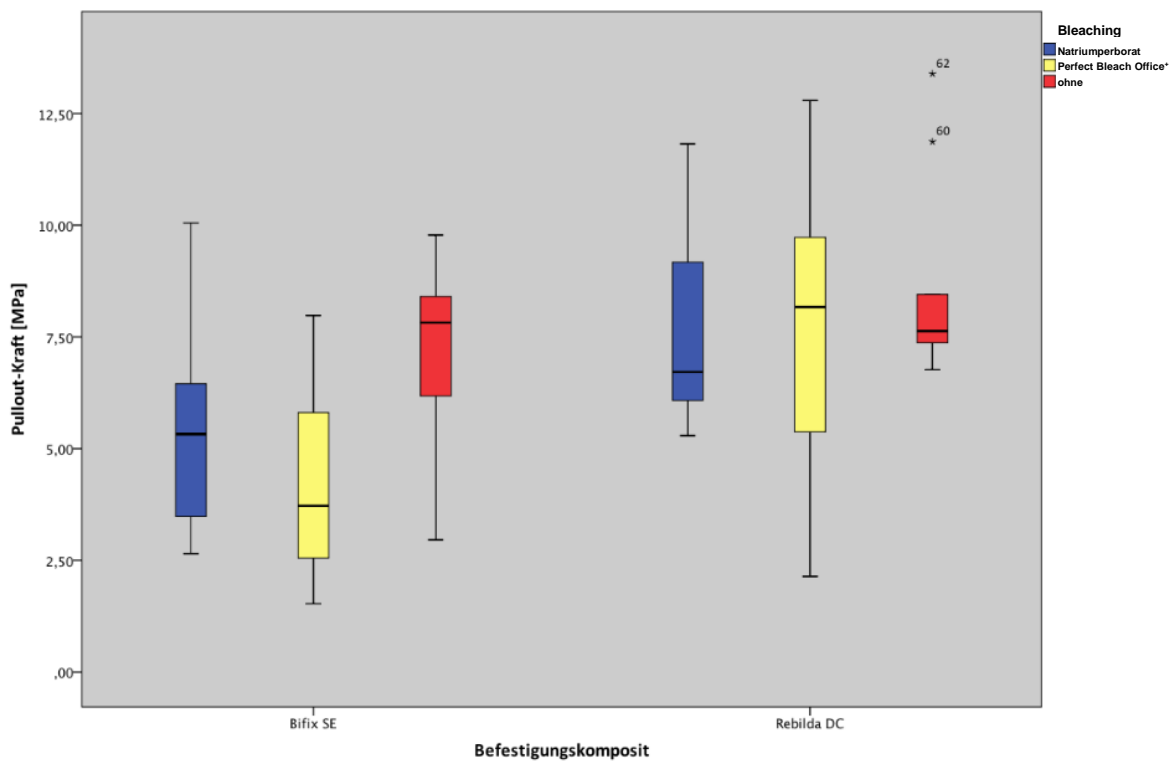
### 7.2.2 Kruskal-Wallis-Test

Das Ergebnis des nicht-parametrischen Kruskal-Wallis-Tests war signifikant ( $p=0,001$ ).

Um einen Überblick über die gesamten Haftwerte der einzelnen 6 Stichproben zu erhalten, wurden die Mittelwerte in eine quantitativ absteigende Reihenfolge gebracht:

Versuchsgruppen	Proben- anzahl	Mittelwert (MPa)	Medianwert (MPa)	Standard- abweichung (MPa)	Maximum (MPa)	Minimum (MPa)
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)	12	5,23 2	5,33	2,13	10,05	2,65
<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)	12	7,60 5	6,72	2,07	11,82	5,29
<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)	12	4,23 1	3,72	2,20	7,98	1,53
<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)	12	7,59 4	8,17	3,12	12,79	2,14
<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)	11	7,08 3	7,82	2,11	9,78	2,96
<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	11	8,62 6	7,63	2,20	13,39	6,77

**Tab. 7:** Ergebnisse der deskriptiven Statistik



**Abb. 4:** Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Pull-out-Kräfte der einzelnen Versuchsgruppen

Basierend auf einer rein visuellen Interpretation der Versuchsdaten konnten zunächst folgende Aussagen getroffen werden, die jedoch im nachfolgenden Mann-Whitney-Test auch statistisch belegt wurden.

Aus den 6 Versuchsgruppen wiesen die 3 Gruppen mit *Rebilda DC* als Befestigungskomposit einen insgesamt höheren Haftverbund auf, als die Gruppen mit *BiFix SE*, unabhängig vom Bleaching-Material (**Abb. 4**).

Bei Betrachtung des verwendeten Bleaching-Materials fiel auf, dass sowohl in den *Rebilda DC*-, als auch *BiFix SE* Testgruppen, die ungebleichte Kontrollgruppe den höchsten Haftverbund aufwies (**Tab. 7**). An zweiter Stelle standen die Gruppen mit Natriumperborat. Die Bleicheinlagen mit dem geringsten Haftverbund war *Perfect Bleach Office+*.

Da der Kruskal-Wallis-Test lediglich untersucht, ob allgemein eine Signifikanz zwischen den Testgruppen vorliegt, gibt er keine Auskunft, inwiefern sich die Gruppen im Vergleich zueinander unterscheiden. Dies wurde im folgenden statistischen Testverfahren mittels Mann-Whitney-Test genauer untersucht.

### 7.2.3 Mann-Whitney-Test

Im paarweisen Vergleich wurde deutlich, dass die aufgebrachte Zugkraft für die gebleichten Testgruppen mit *BiFix SE* als Befestigungskomposit ( $A_1$  und  $B_1$ ) signifikant geringer war, als bei ihren Gegentestgruppen  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  und  $C_1$ . Proben der Gruppe  $A_1$  und  $B_1$  wiesen im Vergleich zu den anderen Gruppen die signifikant geringste Haftfestigkeit auf.

Bei der Gegenüberstellung der Gruppen  $A_1$  vs.  $B_1$  und  $A_2$  vs.  $B_2$  zeigte sich, dass die Wahl der Bleaching-Einlage (Natriumperborat oder *Perfect Bleach Office+*) keinen signifikanten Einfluss auf den Haftverbund hatte, da kein signifikanter Unterschied in den Haftwerten vorlag.

Nun stellt sich die Frage, ob die Haftwerte nach Bleichtherapie überhaupt unterschiedlich sind. Dies wurde mithilfe des Mann-Whitney-Tests untersucht, indem die behandelten Gruppen mit unbehandelten Gruppen verglichen wurden.

Es zeigten sich für Kontrollgruppe C<sub>1</sub> mit *BiFix SE* signifikante Unterschiede zu ihrer gebleichten Referenzgruppe A<sub>1</sub> und B<sub>1</sub> (Mann-Whitney  $p \leq 0,05$ ). Somit stellte sich heraus, dass bei der Verwendung von *BiFix SE* nicht die Wahl zwischen den beiden Bleichmaterialien einen signifikanten Einfluss auf den Haftverbund des Befestigungskomposits hat, sondern ob überhaupt ein Bleichmittel genutzt wurde oder nicht.

Gebleichte Proben mit dem Befestigungskomposit *Rebilda DC* (A<sub>2</sub> und B<sub>2</sub>) hingegen zeigten weder untereinander, noch im Vergleich mit ihrer Kontrollgruppe (C<sub>2</sub>) einen signifikanten Unterschied.

Auch die beiden Testgruppen C<sub>1</sub> und C<sub>2</sub>, die nicht gegenüber der unabhängigen Variablen des Bleichens exponiert waren und somit als Kontrollgruppen für diesen Versuch dienten, wiesen untereinander keinen signifikanten Unterschied zwischen ihren Haftwerten auf. Somit waren die Adhäsionskräfte der beiden nicht-manipulierten Befestigungskomposite vergleichbar. Sollten somit im Paarvergleich die anderen Testgruppen signifikant unterschiedliche Pull-out-Versuchsdaten aufweisen, so konnte nicht der allgemeine Unterschied in der Haftkraft der beiden zu testenden Komposite dafür verantwortlich sein.

Aus den Ergebnissen des Mann-Whitney-Tests (**Tab. 8**) kann geschlossen werden, dass vor einer Bleichtherapie die Haftwerte der Befestigungskomposite *BiFix SE* und *Rebilda DC* vergleichbar sind. Bei *BiFix SE* lagen, unmaßgeblich ob mit Natriumperborat oder *Perfect Bleach Office+* gebleicht, signifikante Unterschiede in der Haftfestigkeit vor, jedoch nicht bei *Rebilda DC*.

1. Testgruppe	vs	2. Testgruppe	Werte
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)		<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)	0,013*
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)		<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)	0,299
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)		<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)	0,050*
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)		<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)	0,042*
<b>Gruppe A1</b> (Natriumperborat + BiFix SE)		<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	0,001*
<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)		<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)	0,004*
<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)		<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)	0,908
<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)		<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)	0,902
<b>Gruppe A2</b> (Natriumperborat + Rebilda DC)		<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	0,166
<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)		<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)	0,007*
<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)		<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)	0,008*
<b>Gruppe B1</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + BiFix SE)		<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	0,001*
<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)		<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)	0,712
<b>Gruppe B2</b> (Perfect Bleach Office <sup>+</sup> + Rebilda DC)		<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	0,553
<b>Gruppe C1</b> (Keine Bleaching-Einlage + BiFix SE)		<b>Gruppe C2</b> (Keine Bleaching-Einlage + Rebilda DC)	0,398

**Tab. 8:** Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests

(Werte mit \*=signifikante Unterschiede/  $p < 0,05$ )

### **7.3 Frakturanalyse**

Nach dem Pull-out-Versuch wurden alle 70 extrudierten Spreader einer Frakturanalyse unter einem Lichtmikroskop unterzogen, um den Frakturmodus zu bestimmen. Es wurden 4 verschiedene Frakturtypen unterschieden:

#### **7.3.1 Adhäsionsbruch**

Von einem Adhäsionsbruch spricht man, wenn der Haftverbund des Befestigungskomposits nach dem Debonding vollständig zur Materialoberfläche (Spreader oder Wurzeldentin) versagt. Das Resultat ist eine freiliegende Materialoberfläche. Bei dem Adhäsionsbruch wird zwischen einem Versagen der Klebeverbindung zum Wurzeldentin (AD) oder zur Spreaderoberfläche (AS) unterschieden, die durch eine rau erscheinende Spreaderoberfläche gekennzeichnet ist.

#### **7.3.2 Kohäsionsbruch (K)**

Der Kohäsionsbruch (K) beschreibt in der Prüfpraxis einen Bruch im Gefüge der Kompositmasse selbst. Das Kriterium des Kohäsionsbruches beinhaltet das Vorhandensein von Komposit an der gesamten Metalloberfläche.

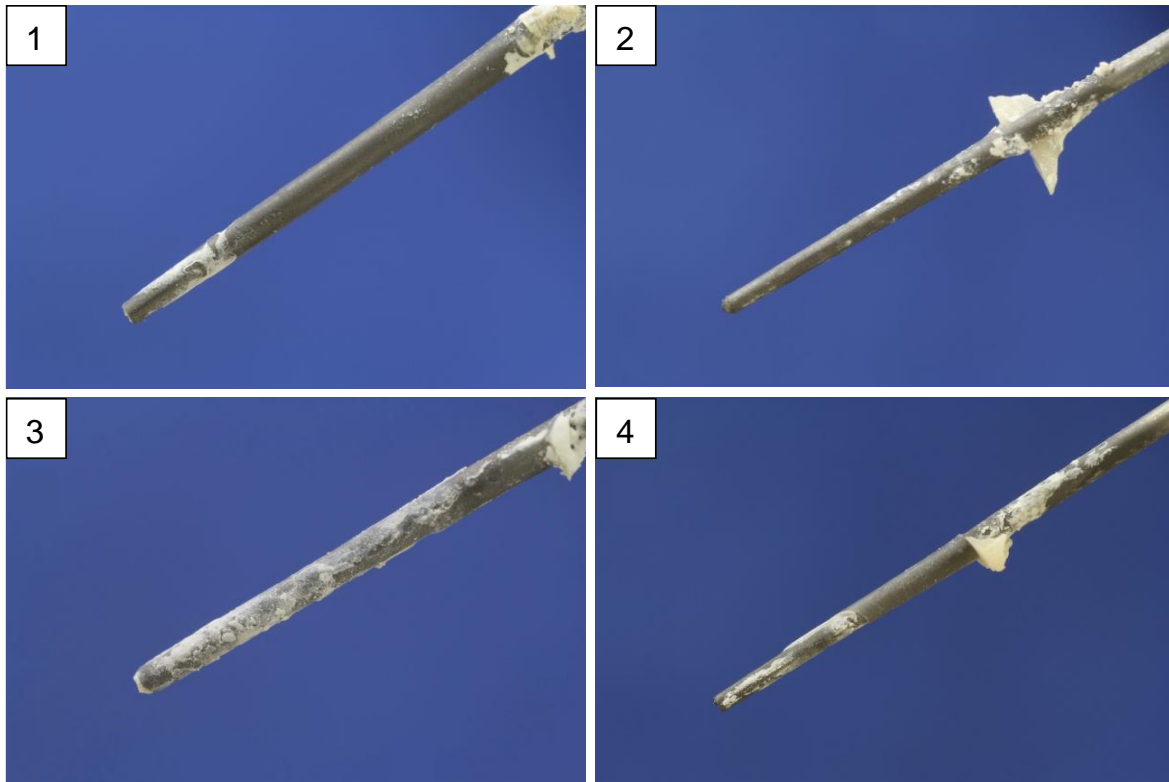
#### **7.3.3 Mischbruch**

In der Praxis wird von einem Mischbruch gesprochen, wenn das Bruchbild auf der Spreaderoberfläche sowohl Bereiche mit, als auch Bereiche ohne Kompositreste zeigt. Ein kombinierter Bruchmechanismus aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch tritt demnach örtlich verteilt auf. Bei der Analyse wird zusätzlich der primär dominierende Bruchtyp genannt.

#### **7.3.4 Stiftfraktur**

Bricht der Stift während des Pull-out-Versuches, wird diese Bruchform als Stiftfraktur bezeichnet. Durch die Materialwahl des Stiftes kann die Wahrscheinlichkeit für eine Stiftfraktur beeinflusst werden. Somit tritt diese Bruchform in der Versuchsreihe mit Stahlstiften nicht auf.





**Abb. 5:** Adhäsive Bruchtypen (1. adhäsives Versagen zum Dentin (AD), 2. adhäsives Versagen zum Spreader (AS), 3. kohäsives Versagen (K), 4. Mischbruch mit primär dominierendem adhäsivem Versagen zum Dentin)

#### 7.4 Auswertung der Spreader

Es konnten innerhalb der einzelnen Versuchsgruppen sowohl eindeutige, als auch gemischte Frakturmodi festgestellt werden. Bei den gemischten Brüchen waren mindestens 2 verschiedene Brucharten vorhanden, die daraufhin nach dem vorherrschenden Modus definiert wurden.

Der Vergleich innerhalb der Kompositgruppen zeigte für A<sub>1</sub> und B<sub>1</sub> (*BiFix SE*) sowie A<sub>2</sub> und B<sub>2</sub> (*Rebilda DC*) sehr ähnliche Frakturmodi.

Bei den gebleichten Versuchsgruppen mit *BiFix SE* überwog allgemein der Adhäsionsbruch des Komposits zum Dentin, wohingegen bei *Rebilda DC* häufiger eine kombinierte Fraktur mit Kohäsionsbruch als primärer Modus vorlag.

Die Brucharten der beiden Kontrollgruppen C<sub>1</sub> und C<sub>2</sub> waren untereinander ebenfalls vergleichbar. Bei diesen Gruppen lag das höchste Auftreten des gemischten Kohäsionsbruches vor (C<sub>1</sub> 70%, C<sub>2</sub> 73%). Die Kontrollgruppen hoben sich zudem von den anderen Gruppen ab, dass es nie zu einer reinen Adhäsionsfraktur am Dentin kam.

## **8 Diskussion**

### **8.1 Diskussion der Methodik**

#### **8.1.1 Auswahl und Vorbereitung der Probenzähne**

Um in dieser In-vitro-Studie die In-vivo-Verhältnisse möglichst naturgetreu nachzuahmen, wurden Zähne der zweiten Dentition gewählt. Um den Einfluss von unkontrollierten Variablen zu minimieren und bei allen Proben von einer ähnlichen Situation ausgehen zu können, wurde auf folgende Kriterien bei der Zahnauswahl geachtet:

- Zähne der zweiten Dentition
- abgeschlossenes Wurzelwachstum
- einwurzelig
- gerader Wurzelkanal
- runder Wurzelkanalquerschnitt
- kein karieszerstörter Zahn
- keine endodontische Vorbehandlung

In der Praxis ist es kaum realisierbar, Zähne im gleichen Alter und Zustand zu sammeln. Daher können die Messergebnisse durch Sekundär-, Reizdentinbildung und Mikrorissen beeinflusst werden. Zähne weisen altersbedingte Veränderungen an der Zahnhartsubstanz auf, wobei der Mineralgehalt im Wurzelkanaldentin zunimmt und sich Kollagenanteile reduzieren. Auch das Frakturverhalten (CARRIGAN et al. 1984; NAZARI et al. 2009) und die Knoop-Härte (CRAIG et al. 1959) der Zähne verändern sich im Alter.

Die Vergleichbarkeit der Zähne wird nicht nur durch die unterschiedlichen Alterungsprozesse und Abnutzungsgrade determiniert, sondern es bestehen auch allgemein Variablen in Morphologie und Konfiguration der Wurzelkanäle zwischen den Zähnen (HÜLSMANN et al. 2003). Auch innerhalb einer Zahnschicht selbst variiert die Zusammensetzung, z.B. nimmt die Dichte der Dentinkanälchen vom

koronalen zum apikalen Wurzelbereich ab (MJÖR et al. 1996; SCHELLENBERG et al. 1992).

Um weitere Einflussfaktoren für abweichende Versuchsergebnisse zu verringern und eine möglichst identische Wurzelkanaloberfläche zu schaffen, wurde mit allen Versuchszähnen gleich vorgegangen:

- Dekapitulierung auf eine einheitliche Wurzellänge von 10 mm
- maschinelle Aufbereitung der Wurzelkanäle (*BioRaCe*-System bis ISO 60)

Jedoch stellte sich die Beurteilbarkeit der aufbereiteten Wurzelkanäle in Bezug auf einen runden Querschnitt als schwierig heraus, da selbst anhand der zweidimensionalen Darstellung des Wurzelkanals mittels Röntgenbild minimale Differenzen nicht ausgeschlossen werden konnten.

Die anschließende Dunkellagerung der Proben in einem *Eppendorf*-Gefäß mit einem in Aqua dest. getränktem Schaumstoffpellet bei Zimmertemperatur (23°C) sollte das feuchte Milieu in der Mundhöhle nachahmen.

Trotz der Maßnahmen zur Schaffung einheitlicher Ausgangsbedingungen, muss bei In-vitro-Studien beachtet werden, dass natürliche Materialien nicht standardisiert werden können. Aussagen die daraus folgend getroffen werden, dürfen nicht uneingeschränkt verallgemeinert und auf klinische Situationen übertragen werden.

### **8.1.2 Interne Bleicheinlage und Konzentration**

In dieser Versuchsreihe wurden die Bleichmittel Natriumperborat und *Perfect Bleach Office+* (35% Wasserstoffperoxid) getestet. Der Vergleich beider Bleichmaterialien beinhaltete zwei verschiedene Wirkstoffe und Konzentrationen, die sich auf das Wurzelkanalentin auswirkten. Die Applikationsart hingegen war bei beiden gleich. Der Bleicherfolg wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt, lediglich die Haftwerte der Befestigungskomposite *BiFix SE* und *Rebilda DC* mit und ohne Bleichtherapie wurden untersucht.

Für die interne Bleichtherapie der Testzähne wurde auf die Walking-Bleach-Technik zurückgegriffen. Entsprechend der Stellungnahme der DGZMK von 2000 wurde das hierfür empfohlene Natriumperborat mit Aqua dest. gemischt verwendet. Alternativ eignet sich auch 3%iges Wasserstoffperoxid. Der aufhellende Effekt ist sowohl bei der Anmischung mit destilliertem Wasser als auch mit 3%igem Wasserstoffperoxid der gleiche (ATTIN 2009). Jedoch wurde von einigen Autoren die Verwendung von Aqua dest. bevorzugt empfohlen, da der pH-Wert mit sinkender Konzentration der Wasserstoffperoxid-Beimischung steigt. Aqua dest. hingegen weist initial die höchsten pH-Werte auf, wodurch Komplikationen durch die Bleichtherapie verringert werden (ROTSTEIN et al. 1991b, WEIGER et al. 1993). Auch kann das Risiko der lateralen Wurzelresorption durch Verwendung von Aqua dest. anstelle von Wasserstoffperoxid verringert werden, da Wasserstoffperoxid in höherem Maße durch das Dentin diffundiert (WEIGER et al. 1994).

*Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> reagiert auf hochkonzentrierter Wasserstoffperoxid-Basis (35%). In Bezug auf eine einmalige Applikation zeigen höher konzentrierte Bleichmittel mit Wasserstoffperoxid eine effektivere aufhellende Wirkung als niedriger konzentrierte Bleichmittel. Auf die gesamte Therapiedauer mit mehrmaliger Applikation bei Verwendung gering konzentrierter Wasserstoffperoxid-Agenen gesehen, ist die endgültige Bleichwirkung jedoch ähnlich (SULIEMAN et al. 2004b).

DUNN zeigte 1998, dass bereits 30% Wasserstoffperoxid das Risiko der Wurzelresorption erhöht. Auch die Zytotoxizität des Bleichmittels gegen die Desmodontalzellen konnte bereits bei einer 30%igen Konzentration Wasserstoffperoxid nachgewiesen werden (KINOMOTO et al. 2001). Daher wird bei der Walking-Bleach-Technik eine dichte Wurzelfüllung mit koronaler Deckfüllung, die auf Gingivaniveau verlaufen soll, vorausgesetzt, um das umliegende Parodont vor Penetration der Peroxide zu schützen (DGZMK 2000). Da es sich hier um eine In-vitro-Studie handelte, konnte darauf verzichtet werden. Es wurde lediglich der Haftverbund zwischen Dentinoberfläche und Befestigungskomposit untersucht, wodurch das Bleichen des gesamten Wurzelkanals gerechtfertigt werden kann.

Um die Bleichsubstanzen aus dem Wurzelkanal zu entfernen, wurden diese mittels *EndoActivator* hydrodynamisch gespült. Der oszillierende, nicht schneidende Kunststoffaufsatz (*Activator Tips*) aktivierte die Spülflüssigkeit, indem Strömungsphänomene im Wurzelkanal erzeugt wurden (Dentsply Gebrauchsanweisung). Dadurch wurden schwer zugängliche Areale besser erreicht als im Vergleich mit Handspülung (Hecker et al. 2007).

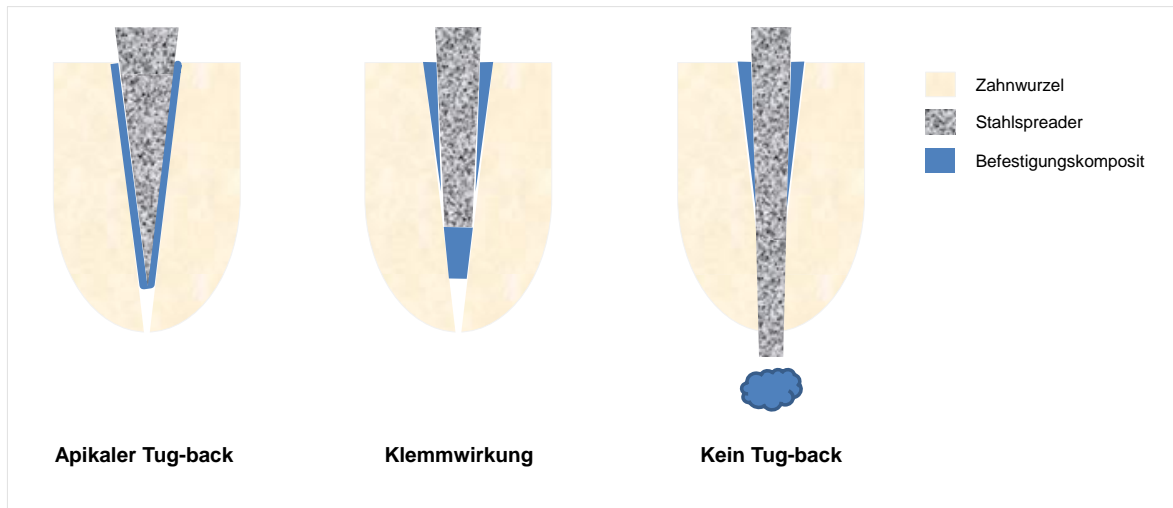
### **8.1.3 Einsatz von Stahlspreader zur Analyse des Haftverbunds**

Der in dieser Studie angewandte Pull-out-Versuch basiert auf dem Studienkonzept von EBERT et al. 2011, welches erstmals den Einsatz von Stahlsreadern als Medium für die Haftverbundanalyse von intrakanalär zementierten Stiften einsetzte.

Der Einsatz von Stahlsreadern, die so in der Praxis nicht in Gebrauch sind, beruht rein auf seinen Materialeigenschaften. Es findet weder eine Verformung, noch Fraktur des Stahlstiftes statt, wodurch der mögliche Einflussfaktor „Bleaching“ mit dieser Methode geeignet untersucht werden kann. Die gezielte Auswahl des Stiftmaterials und -designs reduzieren die Einflussfaktoren, die die Testergebnisse beeinflussen können. Die Stahlspreader bieten eine angemessene Transmission der Kräfte, die während des Pull-out-Versuches erzeugt werden, auf den Befestigungskomposit im gesamten Wurzelkanal. Es wurden bereits eine Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten nach dem Vorbild des Studiendesigns von Ebert et al. zur Testung der Haftverbunde verschiedener Materialien verfasst, die als Referenzstudien herangezogen werden können (Günther 2015; Plum 2012; Rudd 2015).

Die Versuchsanordnung beruht auf der Single-cone-Technik, bei der ein einzelner Wurzelstift für die Füllung im Kanal verwendet wird. Ziel ist die Vergleichbarkeit der Versuchszähne innerhalb der Gruppen zu erhöhen und eine Veränderung der Haftwerte durch Einflussgrößen gering zu halten. Die Verwendung eines kleineren Stahlsreaders (ISO 55) mit apikalem Tug-back für den auf ISO 60 aufbereiteten Wurzelkanal verhinderte eine zu frühe Klemmwirkung des Spreaders. Somit konnten während der Pull-out-Analyse rein die Adhäsionskräfte der Befestigungskomposite

zum Wurzelkanalidentin ermittelt werden. Zusätzlich wirkte der apikale Tug-back-Effekt gegen ein zu dünnes Verpressen der Kompositschicht zwischen der Stiftoberfläche und Wurzelkanalwand und verhindert, dass das gesamte Komposit aus dem Wurzelkanal gepresst wurde.



**Abb. 6:** Passung des Stahlspreaders

Um eine möglichst einheitliche Kompositschichtstärke zu erreichen, wurde der benetzte Spreader mit gleichmäßiger Kraft in den Wurzelkanal eingebracht und überschüssiges Material aus dem Kanal gepresst. Jedoch musste berücksichtigt werden, dass minimale Unterschiede im Wurzelkanalquerschnitt zu Differenzen in der Schichtstärke führen und somit das Ergebnis verfälschen könnten.

Durch die Konditionierung der Stahlspreader (Sandstrahlung, Silikatisierung und Silanisierung) wurde die Benetzbarkeit der Grenzfläche und der Verbund zwischen der Stahloberfläche und des Befestigungskomposits erhöht, wie in Kapitel 4.8 *Konditionierung von Wurzelkanalstiften* bereits erläutert wurde.

Trotz standardisierter Vor- und Aufbereitung der Wurzelkanäle, Adjustierung und Konditionierung der Stahlspreader konnte eine Beeinflussung durch Einflussfaktoren nicht gänzlich ausgeschlossen werden, sodass Schwankungen in den Testergebnissen auftreten könnten.

#### 8.1.4 Einfluss der Schmierschicht

Durch mechanische Bearbeitung von Dentin, z.B. bei Präparation von Kavitäten oder Wurzelkanalaufbereitung, entsteht eine amorphe Struktur aus Dentin- und Pulparesten, Wasser und Bakterien, die als Schmierschicht bezeichnet wird (EICK et al. 1970; FRANKENBERGER 2008a; OLIVEIRA et al. 2003; WHITE et al. 1989). Blockiert die Schmierschicht die Öffnung der Dentintubuli durch Ausbildung von Smear Plugs, kann es durch mangelnde Penetrationsmöglichkeiten zu einer Verminderung der Verbundfestigkeit zwischen Befestigungskomposit und Dentinoberfläche führen (PASHLEY et al. 1981). Gleichzeitig bietet die Schmierschicht persistierenden Mikroorganismen ein Reservoir und bildet somit einen potenziellen Infektionsherd (BYSTRÖM et al. 1985). Aufgrund dessen wird in der Stellungnahme der DGZMK von 2006 die Entfernung der Schmierschicht empfohlen. Geeignet sind Spüllösungen mit EDTA oder Zitronensäure. Darüber hinaus sind Säuren, die bei Konditionierung der Zahnhartsubstanz für Dentinadhäsive verwendet werden, in der Lage, die Schmierschicht ausreichend effektiv zu entfernen (BÜRCEL 2008; FRANKENBERGER et al. 2008b). Für die Dentinkonditionierung wird am häufigsten 35-40%ige Phosphorsäure verwendet. Diese dringt entlang der Dentintubuli in die Zahnhartsubstanz ein und erzeugt ein ca. 3-20 µm tiefes Ätzmuster (Perdigao et al. 1996; Perdigao und Frankenberger 2001).

#### 8.1.5 Zementierung der Spreader

In dieser Studie fand keine zusätzliche Vorbehandlung der Dentinoberfläche mit Spüllösungen statt, da die Schmierschicht mittels Self-Etch-Technik entfernt wurde. Das selbstadhäsive Befestigungskomposit (*BiFix SE*) vereint Adhäsivsystem und Komposit in einem, wohingegen *Rebilda DC* ein zusätzliches All-in-one-Dentaladhäsivsystem (*Futurabond U*) benötigt. Die Self-Etch-Systeme sind in der Lage, mit ihren sauren Monomeren die Schmierschicht aufzulösen und das darunterliegende Dentin zu demineralisieren. Gleichzeitig fungieren sie als Adhäsiv und Primer. Das Ätzergebnis ist abhängig von der Höhe des pH-Wertes des Self-



Etch-Präparates, der zwischen 1 und 2 liegt (TAY et al. 2001). Der pH-Wert ist jedoch kein Parameter für den Langzeiterfolg und die Verbundfestigkeit zur Zahnhartsubstanz (KANEMURA et al. 1999).

Beim Einbringen von *BiFix SE* und *Rebilda DC* in den Wurzelkanal wurde strikt nach Herstellerangaben vorgegangen. Der Indikationsbereich der beiden Komposite liegt unter anderem in der definitiven Befestigung von Wurzelstiften (VOCO Gebrauchsanweisung).

Die Komposite wurden vorerst im Überschuss mittels ISO 35 Feile eingebracht um auch die apikalen Bereiche im Wurzelkanal zu erreichen. Anschließend wurden die konditionierten Stahlspreader mit dem jeweiligen Komposit benetzt und mit gleichmäßiger Kraft in den Kanal eingebracht. Auf diese Weise konnte das Risiko vor Lufteinschlüssen im Spaltraum zwischen Spreader und Wurzelkanaloberfläche reduziert und somit ein Verfälschen der Testergebnisse verhindert werden. Zusätzlich wurde die Wurzelfüllung im Anschluss röntgenologisch kontrolliert.

Da es technisch nicht möglich ist, alle Areale im Wurzelkanal gleichermaßen zu beleuchten, wurde auf die Lichtpolymerisation gänzlich verzichtet, um bei der Aushärtung der Befestigungskomposite eine ungleichmäßige lichtinduzierte Polymerisationsschrumpfung zu vermeiden. Durch dualen Härtemechanismus der beiden Komposite konnte eine gleichmäßige Autopolymerisation rein chemisch stattfinden (FRANKENBERGER 2008a). Erst nach 14-tägiger Aushärtezeit wurde der Pull-out-Versuch durchgeführt, um sicher zu gehen, dass eine vollständige Polymerisation im Wurzelkanal stattfand.

#### **8.1.6 Pull-out-Analyse**

Die Verbundfestigkeit zwischen Befestigungskomposit und Dentinoberfläche wurde in dieser Studie nach Vorbild des Pull-out-Versuches von EBERT et al. 2011 ermittelt. Dabei wirkte axial zur Klebefläche eine extrusive Kraft (Scherspannung), die erhöht wurde, bis ein Versagen der Verbundfläche zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanalwand bzw. Spreader eintrat.

Derartige Universalprüfmethode haben durch ihren standardisierten und realisierbaren Aufbau ein internationales Ansehen erlangt und werden aufgrund ihrer geringen Fehleranfälligkeit und Beeinflussung von Störfaktoren zur Untersuchung der Verbundfestigkeit genutzt (D'ARCANGELO et al. 2007). Anhand der Standardisierung der Zugrichtung (axial) und der Beschleunigung (2 mm/min), Radius der Stahlspreeder ( $r=0,3$  mm) und Arbeitslänge der Wurzelkanäle ( $h=8$  mm), war eine Vergleichbarkeit der mit unterschiedlichen Materialien vorbehandelten Proben untereinander möglich. Dadurch ließ sich für alle Probezähne die gleiche Dentin-Verbundfläche von  $17,09 \text{ mm}^2$  mittels Klebeflächengleichung ermitteln.

$$A = \pi(r_1 + r_2) \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + h^2}$$

Die Berechnung der Dentin-Verbundfläche war nötig, um die Scherkraft zu ermitteln, die sich aus den Haftwerten, die von der Universalprüfmaschine abgelesen werden konnten, und der Verbundfläche ergab.

$$\text{Scherkraft (MPa)} = \frac{\text{Haftwert (N)}}{\text{Verbundkraft (mm}^2\text{)}}$$

Trotz Verwendung eines Spreaders, der kleiner als der aufbereitete Wurzelkanal war, und axialer Ausrichtung der Stiftachse, konnte es dennoch bei der Extrusion zur Verkantung des Spreaders im Kanal kommen, sodass Ausreißer in den Haftwerten berücksichtigt werden mussten (COHEN 2002).

## 8.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse in dieser In-vitro-Studie bezieht sich auf die im Pull-out-Versuch ermittelten Haftwerte.

Es bestanden bezüglich Verbundfestigkeit der Kontrollgruppen beider Befestigungskomposite *BiFix SE* (7.08 MPa) und *Rebilda DC* (8,62 MPa) vergleichbare Werte und somit keine signifikanten Unterschiede ( $p=0,398$ ). Dementsprechend konnte vor Bleichtherapie von einer ähnlichen Ausgangsposition gesprochen werden. Nach der Bleichtherapie hingegen zeigten sich bei *BiFix SE*

unabhängig von der Wahl des Bleichmittels signifikante Unterschiede zu den Haftwerten der Kontrollgruppe. Die Werte von *BiFix SE* in Kombination mit den verwendeten Bleichmittel Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> lagen dicht beieinander und unterschieden sich nicht signifikant ( $p=0,398$ ). Daraus ergab sich eine negative Beeinflussung der Verbundfestigkeit des Befestigungskomposits *BiFix SE* nach dem Bleichprozess unabhängig vom Bleichmittel.

Mögliche Ursachen wären, wie in Kapitel 4.6 *Wechselwirkung von Wasserstoffperoxid auf Dentin* bereits beschrieben, Peroxid- oder Sauerstoffrückstände, die nach dem Bleichprozess an der Dentinoberfläche persistierten und ohne Neutralisation zu einer Reduktion der Adhäsion führen könnten (ATTIN et al. 2004b; DISHMAN et al. 1994; MILES et al. 1994). Daher wird empfohlen, die definitive adhäsive Versorgung des Zahnes erst 2-3 Wochen nach Abschluss der Bleichtherapie (CAVALLI et al. 2001) oder nach Neutralisation mit Natriumhypochlorit oder 10%iger Ascorbinsäure-Lösung durchzuführen (LAI et al. 2001).

Einen weiteren Erklärungsansatz bieten DE MUNCK et al. 2004. Sie zeigten durch Phosphorsäureätzung der Dentinoberfläche eine Beeinträchtigung der Haftkraft zu den selbstadhäsiven Kompositen. Durch die Konditionierung mit Säure resultierte eine Auflösung von Schmelzprismen und Freilegung des in Dentin eingebetteten Kollagennetzwerkes. In der vorliegenden Studie wurde die Zahnhartsubstanz nicht mittels Phosphorsäure konditioniert, jedoch konnte durch den internen Bleichprozess eine Veränderung der Dentinstruktur beobachtet werden, wodurch es zum Herauslösen von Kalziumphosphat-Kristallen kam (PECORA et al. 1994; CHNG et al. 2005). Durch die Abnahme des Kalziumgehaltes in der Dentinhaftfläche ist die chemische Bindung der Methacrylatgruppe, der selbstadhäsiven Befestigungskomposite, zur Zahnhartsubstanz limitiert (HIKITA et al. 2007).

Für die Haftwerte der Gruppen mit *Rebilda DC* als Befestigungskomposit ließen sich, gebleicht und ungebleicht, keine signifikanten Unterschiede feststellen. Darüber hinaus zeigte sich auch bei Verwendung von Natriumperborat oder *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> als Bleichmittel kein signifikanter Unterschied in den Haftwerten ( $p=0,908$ ).

Dass bei *Rebilda DC*, im Vergleich zu *BiFix SE*, nach Bleichtherapie keine signifikante Reduzierung der Haftwerte beobachtet wurde, könnte materialspezifische Ursachen haben. *Rebilda DC* benötigt, im Gegensatz zum selbstadhäsiven Befestigungskomposit *BiFix SE*, ein zusätzliches Adhäsivsystem. Die Charakteristika der einzelnen Befestigungskomposite wurden in Kapitel 4.7.1 *BiFix SE* und 4.7.2 *Rebilda DC/ Futurabond U* bereits dargestellt.

Die unterschiedlichen Interaktionen zwischen dem Haftverbund von *BiFix SE* und *Rebilda DC* durch internes Bleaching könnten mit der Benetzbarkeit der freigelegten Kollagenfasern zusammenhängen. Das All-in-one-Adhäsiv *Futurabond U* zeigte eine bessere Penetration dieser Kollagenfasern, wodurch eine höhere Dentinhaftung hergestellt werden konnte. Im Gegensatz dazu war *BiFix SE* durch seine limitierte Fließfähigkeit nicht in der Lage, das Kollagennetzwerk vollständig zu durchdringen, wodurch die Verbundfestigkeit eingeschränkt wurde (FRANKENBERGER et al. DGZ-Gutachten zur Adhäsivtechnik).

## 8.2.1 Prüfung der Hypothesen

**1. Verschiedene interne Bleaching-Einlagen führen zu Unterschieden im Haftverbund der verschiedenen Befestigungskomposite im Wurzelkanaldentin.**

→ Diese Hypothese wird angenommen

Jedoch muss diese allgemein formulierte Hypothese genauer definiert werden.

Die in dieser Studie verwendeten Bleicheinlagen Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> zeigten in Kombination mit den Befestigungskompositen *BiFix SE* und *Rebilda DC* unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf die Adhäsion zum Wurzelndentin.

Während die Verwendung von *Rebilda DC* nach Bleaching des Dentins mit Natriumperborat bzw. *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> keinen signifikanten Unterschied zu den Haftwerten ihrer Kontrollgruppe C<sub>2</sub> aufwies, ließ sich dieses Phänomen nicht für

*BiFix SE* bestätigen. Im Vergleich mit der Kontrollgruppe  $C_1$  wurde die Verbundfestigkeit von *BiFix SE* sowohl nach Bleichtherapie mit Natriumperborat als auch *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> gleichermaßen signifikant verändert. Somit zeigte sich kompositabhängig eine unterschiedliche Auswirkung der einzelnen Bleichmaterialien auf den Haftverbund.

Aus den Ergebnissen dieser Studie lässt sich eine klinische Relevanz und daraus resultierende Konsequenzen für den Praxisalltag herleiten.

Nicht die Auswahl des Bleaching-Materials war ausschlaggebend für eine Verminderung der Adhäsion, denn die Haftwerte der gebleichten Gruppen mit Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> zeigten untereinander keine signifikanten Unterschiede. Jedoch war es von entscheidender Bedeutung, welches Befestigungskomposit für die folgende Versorgung nach der Bleichtherapie verwendet wurde.

In dieser Studie wurden die Komposite auf *BiFix SE* und *Rebilda DC* limitiert, wodurch die hier gestellten Aussagen auch nur auf diese beiden zu übertragen sind. Es müssen weitere Materialien untersucht werden, um übergreifende, allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

**2. Komposite mit integriertem Adhäsivsystem weisen keinen besseren Haftverbund im Vergleich zu Kompositen mit externem Adhäsivsystem auf.**

→ Diese Hypothese wird angenommen

Bei Betrachtung der ungebleichten Gruppen ( $C_1$  und  $C_2$ ) zeigten sich im Vergleich ihrer Haftwerte keine signifikanten Unterschiede. Somit waren die Adhäsionskräfte des Befestigungskomposits mit integriertem - (*BiFix SE*) und zusätzlichem Adhäsivsystem (*Rebilda DC*), ohne Einfluss durch ein Bleaching, vergleichbar.

Wurden die Zähne jedoch gegenüber der unabhängigen Variablen des Bleichens exponiert, zeigten sich signifikante Unterschiede in den Haftwerten der zwei unterschiedlichen Kompositsysteme.

Mögliche Ursache könnte, wie in Kapitel 7.3 *Diskussion der Ergebnisse* bereits erläutert, die unterschiedliche Materialeigenschaft der beiden Komposite sein. Das All-in-one-Adhäsiv *Futurabond U* ist fließfähiger im Vergleich zu *BiFix SE*, wodurch die Penetration der freigelegten Kollagenfasern erleichtert werden könnte.

### 8.2.2 Beurteilung der Frakturmodi

Die Frakturanalyse ergab ein gemischtes Bild aus reinen als auch kombinierten Brüchen.

Ein grundsätzlich kompositabhängiges Frakturverhalten wurde nicht bestätigt, da vergleichbare Werte für die ungebleichten Kontrollgruppen C<sub>1</sub> (*BiFix SE*) und C<sub>2</sub> (*Rebilda DC*) vorlagen. Es überwogen hierbei allgemein die Kohäsionsbrüche, was dafür spricht, dass die ermittelten Haftkräfte dem maximalen Belastungslimit für das Material entsprachen. Reine Adhäsionsbrüche traten in keiner der beiden Gruppen auf.

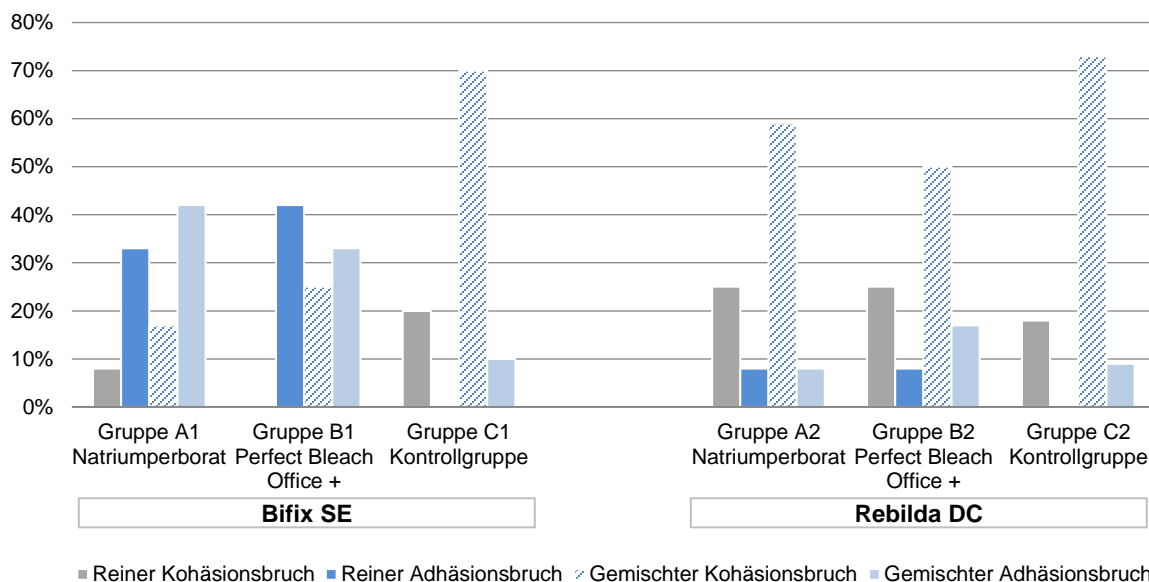
Jedoch zeigten sich im Vergleich der gebleichten mit den ungebleichten Gruppen je nach Kompositzugehörigkeit unterschiedliche Ergebnisse.

In den Gruppen A<sub>1</sub> und B<sub>1</sub> wurde ein deutlich niedrigeres Vorkommen an Kohäsionsbrüchen im Vergleich zur Referenzgruppe C<sub>1</sub> beobachtet. Dafür verschob sich das Frakturverhältnis zu Gunsten der reinen Adhäsionsbrüche am Dentin (Kontrollgruppe 0%, Natriumperborat 33%, *Perfect Bleach Office*\* 42%).

Dieses Ergebnis unterstreicht den Zusammenhang des reduzierten Adhäsionsverhaltens von *BiFix SE* zur Wurzelkanalwand unter gebleichten Bedingungen.

Die Frakturmodi der mit *Rebilda DC* gebleichten Versuchsgruppen A<sub>2</sub> und B<sub>2</sub> hingegen unterschieden sich nur gering von den Ergebnissen ihrer Kontrollgruppe C<sub>2</sub>.

Zwar wiesen die eindeutigen Adhäsionsbrüche im Vergleich zur Gruppe C2 einen geringen Anstieg auf (Kontrollgruppe 0%, Natriumperborat 8%, *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> 8%), jedoch dominierten nach wie vor die gemischten Kohäsionsfrakturen (Kontrollgruppe 73%, Natriumperborat 59%, *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> 50%). Somit wird deutlich, dass der Haftverbund von *Rebilda DC* zur Dentinoberfläche nach einem Bleichprozess kaum beeinflusst wird.



**Abb. 7:** Säulendiagramm zur Darstellung der prozentualen Verteilung der Frakturmodi

Diese Beobachtungen unterstützen zusätzlich die zuvor formulierte Hypothese **‘Verschiedene interne Bleaching-Einlagen führen zu Unterschieden im Haftverbund der verschiedenen Befestigungskomposite im Wurzelkanal-dentin.’**

Anhand dieser Testergebnisse lässt sich für die klinische Praxis nach einer internen Bleachingtherapie auf die nachfolgende Versorgung mit *Rebilda DC* verweisen. Bei *Rebilda DC* wird, unabhängig ob Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup> als Bleicheinlage verwendet wird, im Vergleich zu *BiFix SE* keine signifikante Reduzierung der Haftwerte beobachtet.

Jedoch ist die hier gestellte Empfehlung, aufgrund der ausschließlichen Verwendung der Komposite *BiFix SE* und *Rebilda DC* sowie der Bleichmittel Natriumperborat und *Perfect Bleach Office*<sup>+</sup>, limitiert und ist auch nur auf diese Materialien zu übertragen. Es müssen weitere Produkte untersucht werden, um übergreifende, allgemeingültige Aussagen für die klinische Relevanz treffen zu können.



## 9 Literaturverzeichnis

1. Andersen M, Lund A, Andreasen JO: In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite. *Endodontics and Dental Traumatology* 8, 104-108 (1992)
2. Andreasen JO, Kristerson L: The effect of limited drying or removal of the periodontal ligament upon periodontal healing after replantation of mature permanent incisors in monkeys. *Acta Odontologica Scandinavica* 39, 1-13 (1981)
3. Arens D: The role of bleaching in esthetics. *Dental Clinics of North America* 33, 319-336 (1989)
4. Arwill T, Myrberg N, Söremark R: Penetration of radioactive isotopes through enamel and dentine. *Odontologisk Revy* 20, 47-54 (1969)
5. Attin T, Hellwig E, Hilgers RD: Der Einfluss verstärkender Wurzelstifte auf die Frakturanfälligkeit endodontisch versorgter Zähne. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 49, 586-589 (1994)
6. Attin T: Sicherheit und Anwendung von carbamidperoxidhaltigen Gelen bei Bleichtherapien. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 53, 11-16 (1998)
7. Attin T, Paqué F, Ajam F, Lennon M: Review of the current status of tooth whitening with the walking bleach technique. *International Endodontic Journal* 36, 313-329 (2003)
8. Attin T, Muller T, Patyk A, Lennon AM: Influence of different bleaching systems on fracture toughness and hardness of enamel. *Operative Dentistry* 29, 188-195 (2004a)
9. Attin T, Hannig C, Wiegand A, Attin R: Effect of bleaching on restorative materials and restorations – a systematic review. *Dental Materials* 20, 852-861 (2004b)
10. Attin T: Farbkorrekturen durch Bleichverfahren. *Zahnmedizin up2date* 3, 447-466 (2009)
11. Azevedo RA, Silva-Sousa YTC, Souza-Gabriel AE, Messias DCF, Alfredo E, Silva RG: Fracture resistance of teeth subjected to internal bleaching and restored with different procedures. *Brazilian Dental Journal* 22, 117-121 (2011)
12. Bale WF, Lefevre ML, Hodge HC: Über den anorganischen Aufbau der Zähne. *Naturwissenschaften*, Berlin, Springer (1936)
13. Baratieri LN, Ritter AV, Monteiro Jr S, Caldeira de Andrada MA, Cardoso Vieira LC: Nonvital tooth bleaching: Guidelines for the clinician. *Quintessence International* 26 (1995)
14. Basrani BR, Manek S, Sodhi RN, Fillery E, Manzur A: Interaction between sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate. *Journal of Endodontics* 33, 966-969 (2007)
15. Basting RT, Rodrigues AL, Serra MC: The effect of 10% carbamide peroxide bleaching material on microhardness of sound and demineralized enamel and dentin in situ. *Operative Dentistry* 26, 231-239 (2001)

16. Beckey HD: Massenspektrometrische Untersuchung der Reaktionen und Eigenschaften freier Radikale und Atome. Angewandte Chemie. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (1958)
17. Bürgel P: Haftverbund zweier selbstätzender und selbstadhäsiver Befestigungszemente am Wurzelkanalentin unter dem Einfluss endodontischer Spüllösungen. Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg (2008)
18. Byström A, Sunqvist G: The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. International Endodontic Journal 18, 35-40 (1985)
19. Carrigan PJ, Morse DR, Furst ML, Sinai IH: A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. Journal of Endodontics 10, 359-363 (1984)
20. Cavalli V, Reis AF, Giannini M, Ambrosano GMB: The effect of elapsed time following bleaching on enamel bond strength of resin composite. Operative Dentistry 26, 597-602 (2001)
21. Chng HK, Ramli HN, Yap AUJ, Lim CT: Effect of hydrogen peroxide on intertubular dentine. Journal of Dentistry 33, 363-369 (2005)
22. Cohen S: Pathways of the pulp. Mosby Elsevier, 8th Edition (2002)
23. Craig RG, Gehring PE, Peyton FA: Relation of structure to the microhardness of human dentin. Journal of Dental Research 38, 624-630 (1959)
24. D'Arcangelo C, Cinelli M, De Angelis F, D'Amario M: The effect of resin cement film thickness on the pullout strength of a fiber-reinforced post system. The Journal of Prosthetic Dentistry 98, 193-198 (2007)
25. Dahl JE, Pallesen U: Tooth bleaching a critical review of the biological aspects. Critical Reviews in Oral Biology & Medicine 14, 292-304 (2003)
26. Dayan D, Heifferman A, Gorski M, Begleiter A: Tooth discoloration – extrinsic and intrinsic Factors. Quintessence International 14, 195-199 (1983)
27. De Freitas PM, Turssi CP, Hara AT, Serra MC: Dentin microhardness during and after whitening treatments. Quintessence International 35, 411-417 (2004a)
28. De Freitas PM, Turssi CP, Hara AT, Serra MC: Monitoring of demineralized dentin microhardness throughout and after bleaching. American Journal of Dentistry 17, 342-346 (2004b)
29. De Munck J, Vargas M, Van Meerbeek LK, Hikita K, Lambrechts P, Van Meerbeek MB: Bonding of an auto-adhesive luting material to enamel and dentin. Dental Materials 20, 963-971 (2004)
30. Dentsply: Gebrauchsanweisung EndoActivator.  
[https://www.dentsply.com/content/dam/dentsply/pim/manufacture/Endodontics/Irrigation\\_Activation/Irrigants/EndoActivator/Endo-Activator-xnoqhis-en-1402](https://www.dentsply.com/content/dam/dentsply/pim/manufacture/Endodontics/Irrigation_Activation/Irrigants/EndoActivator/Endo-Activator-xnoqhis-en-1402)

31. DGZMK: Stellungnahme zum Thema Bleichen von verfärbten Zähnen. (2000)  
[http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/Das\\_Bleichen\\_verfaerbter\\_Zaehne.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Das_Bleichen_verfaerbter_Zaehne.pdf)
32. DGZMK: Stellungnahme zum Thema Wurzelkanalaufbereitungen. (2001)  
[http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/Wurzelkanalaufbereitungen.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Wurzelkanalaufbereitungen.pdf)
33. DGZMK: Stellungnahme zum Thema Wurzelkanalspülung. (2006)  
[http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/DGZMK\\_Stellungnahme\\_Wurzelkanalspuelung\\_10\\_2006.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/DGZMK_Stellungnahme_Wurzelkanalspuelung_10_2006.pdf)
34. Dietschi D: Nonvital bleaching: general considerations and report of two failure cases. *International Journal of Esthetic Dentistry* 1, 52–61 (2006)
35. Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A: Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature – Part 1: Composition and micro- and macrostructure alterations. *Quintessence International* 38, 733-749 (2007)
36. Dishman MV, Covey DA, Baughan LW: The effects of peroxide bleaching on composite to enamel bond strength. *Dental Materials* 10, 33-36 (1994)
37. Dunn JR: Dentist-prescribed home bleaching: current status. *Compendium of Continuing Education in Dentistry* 19, 760-764 (1998)
38. Ebert J, Leyer A, Günther O, Lohbauer U, Petschelt A, Frankenberger R, Roggendorf MJ: Bond strength of adhesive cements to root canal dentin tested with a novel pull-out approach. *Journal of Endodontics*, 37(11), 1558-1561 (2011)
39. Eichner K, Kappert HF: Strukturen und Eigenschaften der Monomere und Oligomere. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*, 48-50 (2000)
40. Eick JD, Wilko RA, Anderson CH, Sorensen SE: Scanning electron microscopy of cut tooth surfaces and identification of debris by use of the electron microprobe. *Journal of Dental Research* 49 (1970)
41. Feinman RA, Goldstein RE, Garber DA: Bleaching teeth. Berlin, Quintessenz Verlag (1987)
42. Fernandes AS, Dessai GS: Factors affecting the fracture resistance of post-core reconstructed teeth: a review. *International Journal of Prosthodontics* 14, 355-363 (2001)
43. Fitch CP: Etiology of the discoloration of teeth. *Ann Arbor, Dental Cosmos* 3, 133-136 (1861)
44. Frankenberger R: Adhäsiv-Fibel. Balingen, Spitta Verlag, 3. Aufl. (2008a)
45. Frankenberger R, Lohbauer U, Roggendorf MJ, Naumann M, Taschner M: Selective enamel etching reconsidered: better than etch-and-rinse and self-etch? *Journal of Adhesive Dentistry* 10, 339-344 (2008b)
46. Frankenberger R, Heidemann D, Staehle HJ, Hellwig E, Blunck U, Hickel R: DGZ-Gutachten zur Adhäsivtechnik. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* (2014)
47. Friedman S: Internal bleaching: long-term outcomes and complications. *Journal of the American Dental Association* 128, 26-30 (1997)

48. Gerth HU, Dammaschke T, Zuchner H, Schäfer E: Chemical analysis and bonding reaction of RelyX Unicem and Bifix composites-a comparative study. *Dental Materials* 22, 934-941 (2006)
49. Glockner K, Ebeleseder K: Indikationen und Grenzfälle für das Bleichen von devitalen Frontzähnen. *Quintessenz Verlag* 44, 519-527 (1993)
50. Glockner K, Ebelseder K, Städler P: Das Bleichen von verfärbten Frontzähnen. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 52, 311-317 (1997)
51. Guggenberger R: Das Rocatec-System. Haftung durch tribochemische Beschichtung. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 44, 874-876 (1989)
52. Guldener PHA, Langeland K: Endodontologie. Berlin, Thieme Verlag, 2. Aufl. (1987)
53. Günther O: Analyse des Haftverbunds acht verschiedener Befestigungs-zemente zum Wurzelkanalentin. Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg (2015)
54. Hecker H, Amato M, Weiger R: Die Wurzelkanalspülung. *Zahnmedizin up2date* 2, 89-108 (2007)
55. Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag, 5. Aufl. (2009)
56. Hoppenbrouwers PMM, Driessens FCM, Birggreveb JMPM: The vulnerability of unexposed human dental roots to demineralization. *Journal of Dental Research* 65, 955-958 (1986)
57. Hülsmann M, Peters OA, Dummer PM: Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics* 10, 30-76 (2003)
58. Hülsmann M: Endodontie. Georg Thieme Verlag (2008)
59. Janda R: Allgemeine Prinzipien der Klebetechnik: Kleben und Klebetechniken. München, Hanser (1992)
60. Joiner A: The bleaching of teeth: a review of the literature. *Bebington, Unilever Oral Care* (2006)
61. Joiner A, Thakker G, Cooper Y: Evaluation of a 6% hydrogen peroxide tooth whitening gel on enamel and dentine microhardness in vitro. *Journal of Dentistry* 32, 27-34 (2004)
62. Kanemura N, Sano H, Tagami J: Tensile bond strength to and SEM evaluation of ground and intact enamel surfaces. *Journal of Dentistry* 27, 523-530 (1999)
63. Kehoe JC: PH reversal following in vitro bleaching of pulpless teeth. *Journal of Endodontics* 13, 16-19 (1987)
64. Kim ST, Abbot PV, McGinley P: The effects of Ledermix paste on discolouration of mature teeth. *International Endodontic Journal* 33, 227-232 (2000)
65. Kinomoto Y, Carnes DL, Ebisu S: Cytotoxicity of intracanal bleaching agents on periodontal ligament cells in vitro. *Journal of Endodontics* 27, 574-577 (2001)
66. Klimek J: Initiale Karies und ihre Behandlung. Köln, Deutscher Ärzteverlag, 23-42 (1997).

67. Kozak KM, Duschner HH, Gotz H, White DJ, Zoladz JR: Effects of peroxide gels on enamel and dentin in vitro. *Journal of Dental Research* 80, 209 (2001)
68. Lai SC, Mak YF, Cheung GS, Osorio R, Toledano M, Carvalho RM, Tay FR, Pashley DH: Reversal of compromised bonding to oxidized etched dentin. *Journal of Dental Research* 80, 1919-1924 (2001)
69. Langsdorff v G: Über den Einfluss gewisser Stoffe auf das Zahnbeingewebe. Leipzig, Organ des Central-Vereins Deutscher Zahnärzte, 264-265 (1874)
70. Lewinstein I, Fuhrer N, Churaru N, Cardash H: Effect of different peroxide bleaching regimens and subsequent fluoridation on the hardness of human enamel and dentin. *Journal of Prosthetic Dentistry* 92, 337-342 (2004)
71. Machu W: Das Wasserstoffperoxid und die Perverbindungen. Berlin, Springer Verlag, 2. Aufl. (1951)
72. Madison S, Walton R: Cervical root resorption following bleaching of endodontically treated teeth. *Journal of Endodontics* 16, 570-574 (1990)
73. Marin PD, Bartold PM, Heithersay GS: Tooth discoloration by blood: an in vitro histochemical study. *Endodontics and Dental Traumatology* 13, 132-138 (1997)
74. Matinlinna JP, Lassila LV, Ozcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK: An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. *International Journal of Prosthodontics* 17, 155-164 (2004)
75. Miles PG, Pontier JP, Bahiraei D, Close J: The effect of carbamide peroxide bleach on the tensile bond strength of ceramic brackets – an in-vitro study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 106, 371-375 (1994)
76. Mjör IA, Nordahl I: The density and branching of dentinal tubules in human teeth. *Archives of Oral Biology* 41, 401-412 (1996)
77. Monticelli F, Goracci C, Grandini S, Garcia-Godoy F, Ferrari M: Scanning electron microscopic evaluation of fiber post-resin core units built up with different resin composites. *American Journal of Dentistry* 18, 61-65 (2005)
78. Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Sadek FT, Goracci C, Ferrari M: A simple etching technique for improving the retention of fiber posts to resin composites. *Journal of Endodontics* 32, 44-47 (2006)
79. Monticelli F, Ferrari M, Toledano M: Cement system and surface treatment selection for fiber post luting. *Medicina Oral, Patologia Oral Y Cirugia Bucal* 13, 214-221 (2008)
80. Mortimer EC, Müller U: Chemie. Stuttgart, Thieme Verlag, 10. Aufl. (2010)
81. Nazari A, Bajaj D, Zhang D, Romberg E, Arola D: Aging and the reduction in fracture toughness of human dentin. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 2, 550-559 (2009)
82. Nergiz I, Schmage P, Platzer U, McMullan-Vogel CG: Effect of different surface textures on retentive strength of tapered posts. *Journal of Prosthetic Dentistry* 78, 451-457 (1997)

83. Oliveira SS, Pugach MK, Hilton JF, Watanabe LG, Marshall SJ, Marshall GW: The influence of the dentin smear layer on adhesion: a self-etching primer vs. a total-etch system. *Dental Materials* 19, 758-767 (2003)
84. Papa J, Cain C, Messer H H: Moisture content of vital vs endodontically treated teeth. *Endodontics and Dental Traumatology* 10, 91-93 (1994)
85. Partovi M, Al-Havvaz AH, Soleimani B: In vitro computer analysis of crown discolouration from commonly used endodontic sealers. *Journal of Endodontics* 32, 116-119 (2006)
86. Pashley D, Michelich V, Kehl T: Dentin permeability: effects of smear layer removal. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 46, 531-537 (1981)
87. Pearson HH: Successful bleaching without secondary discolouration. *Journal of the Canadian Dental Association* 17, 200-201 (1951)
88. Pecora JD, Cruz-Filho AM, Sousaneto MD, Silva RG: In vitro action of various bleaching agents on the microhardness of human dentin. *Brazilian Dental Journal* 5, 129-134 (1994)
89. Perdigao J, Lambrechts P, Van Meerbeek MB, Tome AR, Van Meerbeekherle G, Lopes AB: Morphological field emission-SEM study of the effect of six phosphoric acid etching agents on human dentin. *Dental Materials* 12, 262-271 (1996)
90. Perdigao J, Frankenberger R: Effect of solvent and rewetting time on dentin adhesion. *Quintessence International* 32, 385-390 (2001)
91. Perdigao J, Gomes G, Lee IK: The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dental Materials* 22, 752-758 (2006)
92. Plasschaert AJM, Van der Burgt TP: Zahnverfärbungen durch endodontische Materialien. *Stomatologie der DDR* 38, 161-166 (1988)
93. Plotino G, Buono G, Grande N M, Pameier C H, Somma F: Nonvital tooth bleaching: a review of the literature and clinical procedures. *Journal of Endodontics* 34, 394–407 (2008)
94. Plum J: Einfluss verschiedener Spülprotokolle auf den Haftverbund der Sealer Hybrid Root SEAL und ActiV GP zum Wurzelkanalentin. Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg (2012)
95. Rathe F, Nolken R, Deimling D, Ratka-Kruger P: Externe Wurzelresorption. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 116, 245 (2006)
96. Rödiger T: Interaktionen endodontischer Spüllösungen. *Endodontie* 19, 311-316 (2010)
97. Rossi-Fedele G, Doğramacı EJ, Guastalli AR: Antagonistic Interactions between Sodium Hypochlorite, Chlorhexidine, EDTA, and Citric Acid. *Journal of Endodontics* 38, 426-431 (2012)
98. Rotstein I, Torek Y, Misgav R: Effects of cementum defects on radicular penetration by 30% hydrogen peroxide during intra-coronal bleaching. *Journal of Endodontics* 17, 210-230 (1991a)
99. Rotstein I, Friedman S: pH variation among materials used for intracoronal bleaching. *Journal of Endodontics* 17, 376-379 (1991b)

100. Rotstein I, Lehr Z, Gedalia I: Effect of bleaching agents on inorganic components of human dentin and cementum. *Journal of Endodontics* 18, 290-293 (1992)
101. Rotstein I, Dankner E, Goldman A, Heling I, Stabholz A, Zalkind M: Histochemical analysis of dental hard tissues following bleaching. *Journal of Endodontics* 22, 23-24 (1996)
102. Rudd S: Einfluss verschiedener medikamentöser Einlagen auf den Haftverbund von GuttaFlow 2 zum Wurzelkanalentin. Doctoral dissertation, Philipps-Universität Marburg (2015)
103. Schellenberg U, Krey G, Bosshardt D, Nair PN: Numerical density of dentinal tubules at the pulpal wall of human permanent premolars and molars. *Journal of Endodontics* 18, 104-109 (1992)
104. Schmidt AK, Wiegand A: Möglichkeiten der Zahnaufhellung – Bleichen und Alternativen. *Zahnmedizin up2date* 8, 573-585 (2014)
105. Schroeder HE: Orale Strukturbilogie. Stuttgart, Thieme Verlag, 5. Aufl. (2000)
106. Schwartz RS, Robbins JW: Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. *Journal of Endodontics* 30, 289-301 (2004)
107. Smith CT, Schuman N: Restoration of endodontically treated teeth: A guide for the restorative dentist. *Quintessence International* 28, 457-462 (1997)
108. Smith JJ, Cunningham CJ, Montgomery S: Cervical canal leakage after internal bleaching procedures. *Journal of Endodontics* 18, 476-481 (1992)
109. Sulieman M, Addy M, MacDonald E, Rees JS: A safety study in vitro for the effects of an in-office bleaching system on the integrity of enamel and dentine. *Journal of Dentistry* 32, 581-590 (2004a)
110. Sulieman M, Addy M, MacDonald E, Rees JS: The effect of hydrogen peroxide concentration on the outcome of tooth whitening: an in vitro study. *Journal of Dentistry* 32, 295-299 (2004b)
111. Taatz H: Morphophysiologische Grundlagen des orofazialen Systems und Einführung in die spezielle stomatologische Krankheitslehre. Leipzig, Verlag Johann Ambrosius Barth, 94-100 (1976)
112. Tay FR, Pashley DH: Aggressiveness of contemporary self-etching systems. I: Depth of penetration beyond dentin smear layers. *Dental Materials* 17, 296-308 (2001)
113. Thordarson A, Zachrisson B U, Mjör I A: Remodeling of canines to the shape of lateral incisors by grinding: a long-term clinical and radiographic evaluation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 100, 123-132 (1991)
114. Tiller HJ, Göbel R, Magnus B: Der Sandstrahlprozess und seine Einwirkung auf den Oberflächenzustand von Dentallegierungen - Teil II. *Quintessenz Verlag* 10, 2151-2158 (1985)
115. Tronstad L: Root resorption-etiology, terminology and clinical manifestations. *Endodontics and Dental Traumatology* 4, 241-251 (1988)

116. Unlu N, Cobankara FK, Altinoz C, Ozer F: Effect of home bleaching agents on the microhardness of human enamel and dentin. *Journal of Oral Rehabilitation* 31, 57–61 (2004)
117. Valandro LF, Yoshiga S, de Melo RM, Galhano GA, Mallmann A, Marinho CP: Microtensile bond strength between a quartz fiberpost and a resin cement: effect of post surface conditioning. *Journal of Adhesive Dentistry* 8, 105-111 (2006)
118. Van Meerebeek B, Conn L, Duke E, Eick J, Robinson S, Guerrero D: Correlative transmission electron microscopy examination of nondemineralized and demineralized resin-dentin interface formed by two dentin adhesive systems. *Journal of Dental Research* 75, 879-888 (1992)
119. Voco: Gebrauchsanweisung Futurabond U  
<http://www.voco.de/de/product/Futurabond-U/index.html>
120. Voco: Gebrauchsanweisung Rebilda DC  
[http://www.voco.de/de/product/rebilda\\_dc/index.html](http://www.voco.de/de/product/rebilda_dc/index.html)
121. Voco: Gebrauchsanweisung BiFix SE  
[http://www.voco.de/de/product/bifix\\_se/index.html](http://www.voco.de/de/product/bifix_se/index.html)
122. Voco: Gebrauchsanweisung Perfect Bleach Office+  
[http://www.voco.de/de/product/Perfect\\_Bleach\\_Office\\_plus/index.html](http://www.voco.de/de/product/Perfect_Bleach_Office_plus/index.html)
123. Watts A, Addy M: Tooth discolouration and staining: a review of the literature. *British Dental Journal* 193, 73-82 (2002)
124. Weigert WM: Wasserstoffperoxid und seine Derivate: Chemie und Anwendungen. Heidelberg, Dr. Albert Hüthig Verlag (1978)
125. Weiger R, Kuhn A, Löst C: Effect of various types of sodium perborate on the pH of bleaching agents. *Journal of Endodontics* 19, 239-241(1993)
126. Weiger R, Kuhn A, Löst C: Radicular penetration of hydrogen peroxide during intra-coronal bleaching with various forms of sodium perborate. *International Endodontic Journal* 27, 313-317 (1994)
127. Weissmantel CH, Lenk R, Forker W, Linke D: Struktur der Materie. Kleine Enzyklopädie. Mannheim, Bibliographisches Institut (1982)
128. Wennberg A: Biological evaluation of root canal antiseptics using in vitro and in vivo methods. *Scandinavian Journal of Dental Research* 88, 46-52 (1980)
129. West JD: The aesthetic and endodontic dilemmas of calcific metamorphosis. *Practical Periodontics and Aesthetic Dentistry* 9, 289-293 (1997)
130. White GJ, Beech DR, Tyas MJ: Dentin smear layer: an asset or a liability for bonding? *Dental Materials* 5, 379-383 (1989)
131. White DJ, Kozak KM, Duschner HH, Gotz H, Zoldaz JR: Effects of whitening peroxide gels on exposed surface dentine in vitro. *Journal of Dental Research* 80, 209 (2001)
132. Wilmschöfer B: Das Rocatec-System. Nur ein weiteres Verbundsystem oder eine sinnvolle Ergänzung bestehender Systeme. Berlin, Quintessenz Zahntechnik 16, 413-417 (1990)



133. Zimmerli B, Jeger F, Lussi A: Bleaching of nonvital teeth. A clinically relevant literature review. Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin 120, 306-320 (2010)

## 10 Anhang

### 10.1 Materialliste

Alkohol 70%	Hoffman & Sommer, Königsee, Deutschland
Aqua dest.	Zahnklinik Marburg, Universität Marburg, Deutschland
<i>BiFix SE</i>	Voco, Cuxhaven, Deutschland
<i>BioRaCe-System</i>	FKG Dentaire SA, La Chaux-de-Fongs, Schweiz
Boxing Wax	Kavo Kerr Group, Rastatt, Deutschland
C-Feile ISO 15, 35	VDW, München, Deutschland
Diamant-Trennscheibe	Komet, Lemgo, Deutschland
<i>EndoActivator</i>	Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland
<i>VMK Endoneedle Dr. Buquet</i>	Vedefar N.V., Dilbeek, Belgien
<i>Eppendorf-Gefäß 1,5 ml</i>	Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland
<i>Futurabond U</i>	Voco, Cuxhaven, Deutschland
Gutta-Gauge-Messlehre	Omnident, Rodgau, Deutschland
<i>Microbrush</i>	Microbrush, Grafton, Wisconsin, USA
<i>Monobond S</i>	Ivoclar, Schaan, Liechtenstein
NaOCl-Lösung	Zahnklinik Marburg, Deutschland
Natriumperborat	Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA
Omnifix 2ml Spritzen	B.Braun, Melsungen, Deutschland
Papierspitzen ISO 35	Roeko, Coltene/Whaledent, Langenau
<i>Perfect Bleach Office+</i>	Voco, Cuxhaven, Deutschland
<i>Rebilda DC</i>	Voco, Cuxhaven, Deutschland
<i>Rocatec-System</i>	3M Espe, Seefeld, Deutschland
Röntgengerät	Soredex, Helsinki, Finnland
rotes Winkelstück	Kavo, Biberach, Deutschland
Scaler	Hu-Friedy, Chicago, IL, USA
<i>Single Tim Applicators</i>	Voco, Cuxhaven, Deutschland
Spiegelreflexkamera	Canon EOS 500D, Canon, Inc., Tokio, Japan
SPSS Version 19.0	IBM Corp., Armonk, NY, USA

Stahlspreader	Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland
Thymol	Merck, Darmstadt, Deutschland
Universalprüfmaschine Zwick	Zwick/Materials Testing, Ulm, Deutschland

Geschützte Eigennamen wurden im Text durch Kursivschrift gekennzeichnet.

## 10.2 Abkürzungsverzeichnis

#	Größe
%	Prozent
≤	kleiner-gleich
π	3,142
μm	Mikrometer
A	Dentin-Verbundfläche
Abb.	Abbildung
AD	Adhäsionsbruch am Dentin
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxidpartikel
Aqua dest.	destilliertes Wasser
AS	Adhäsionsbruch am Spreader
Bis-GMA	Bisphenol-A-(di)-methacrylat
bzw.	beziehungsweise
C°	Celsius
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>5</sub> Si	3-Methacryloxypropyltrimethoxysilane
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>5</sub> Si	3-Methacryloxypropyltrimethoxysilane
ca.	circa
CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	Harnstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DDDMA	Decandioldimethacrylat
df	degrees of freedom
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
F	Kraft
Fe <sup>2+</sup>	Eisen-II-Ionen
FeS	Eisen-II-Sulfid
g	Gramm
GIZ	Glasionomerzement
h	Höhe

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
HO*	Hydroxylradikal
HOO*	Perhydroxylradikal
ISO	International Organization for Standardization
K	Kohäsionsbruch im Material
MW	Mittelwert
min	Minute(n)
mm	Millimeter
mm/min	Millimeter pro Minute
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
MPa	Megapascal
n	Anzahl
N	Newton
NaOCl	Natriumhypochlorit
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
nm	Nanometer
O*	Singulett-Sauerstoff
p	Signifikanzwert
r	Radius
SiO <sub>2</sub>	Siliziumdioxid
Tab.	Tabelle
UDMA	Urethan-di-methacrylat
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel

### 10.3 Übersicht der Tabellen

<b>Tab. 1:</b> Ätiologie intrinsischer Zahnverfärbung (WATTS et al. 2002)	7
<b>Tab. 2:</b> Übersicht der gebleichten Testgruppe	28
<b>Tab. 3:</b> Verwendetes Spülprotokoll	30
<b>Tab. 4:</b> Übersicht der experimentellen Gruppen	31
<b>Tab. 5:</b> Einstellung der Universalprüfmaschine	33
<b>Tab. 6:</b> Auswertung des Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung der Versuchsgruppen	37
<b>Tab. 7:</b> Ergebnisse der deskriptiven Statistik	38
<b>Tab. 8:</b> Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests	41

### 10.4 Übersicht der Abbildungen

<b>Abb. 1:</b> Peroxide (nach MORTIMER et al. 2010)	13
<b>Abb. 2:</b> Bestandteile der Stiftzementierung	23
<b>Abb. 3:</b> Flowchart des Versuchsdesigns	26
<b>Abb. 4:</b> Boxplot Diagramm zur Darstellung der Pull-out-Kräfte der einzelnen Versuchsgruppen	38
<b>Abb. 5:</b> Adhäsive Bruchtypen	43
<b>Abb. 6:</b> Passung des Stahlsreaders	49
<b>Abb. 7:</b> Säulendiagramm zur Darstellung der prozentualen Verteilung der Frakturmodi	57

## **11 Verzeichnis der akademischen Lehrer**

Meine akademischen Lehrer an der Philipps-Universität in Marburg waren die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Arweiler, Ausschill, Braun, Cetin, Draenert, Feuser, Fischer, Frankenberger, Gente, Gloerfeld, Gockel, Hellak, Himpel, Höffken, Kinscherft, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mengel, Mittag, Moll, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Pieper, Ramaswamy, Richter, Roggendorf, Steiniger, Weihe, Weber, Westermann, Wrocklage

## 12 Lebenslauf



## 13 Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit wie diese schreibt sich nicht von alleine, sondern benötigt tatkräftige Unterstützung und weise Ratschläge, um zum Abschluss zu kommen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mir bei der Erstellung meiner Dissertation zu Seite standen.

Ein großer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Priv.-Doz. Dr. med. dent. habil. Matthias J. Roggendorf für seine Unterstützung, die in diesem Maße nicht als selbstverständlich anzusehen ist. Besonders zu schätzen weiß ich sein stets offenes Ohr für Fragen und Probleme, sowohl im Studium als auch danach.

Dank gebührt auch meinen Eltern und meinem Opa, die es mir nicht nur ermöglicht haben, mich nach dem Studium ganz auf meine Doktorarbeit fokussieren zu können, sondern mir auch immer mit konstruktiver Kritik und hilfreichen Ratschlägen zur Seite standen. Ebenfalls möchte ich meinem Bruder Dat für seine liebevolle Unterstützung und Motivation danken.

Danke auch an Julia, die mir mit Ihrem SPSS Know-How und ihrer freien Zeit zum Kaffee trinken die Fertigstellung erleichtert hat.

Zu guter Letzt möchte ich von ganzem Herzen meinen Freund Moritz danken: für deine Liebe, Unterstützung und Kraft, mit der du mir zur Seite stehst.

## **14 Ehrenwörtliche Erklärung**